

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉTUDE DES MÉCANISMES CÉRÉBRAUX LIÉS À L'EXPERTISE
SCIENTIFIQUE EN ÉLECTRICITÉ À L'AIDE DE L'IMAGERIE PAR
RÉSONANCE MAGNÉTIQUE FONCTIONNELLE

THÈSE

PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN ÉDUCATION

PAR

STEVE MASSON

FÉVRIER 2012

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

Aux cerveaux exceptionnels faisant partie de mon quotidien

REMERCIEMENTS

Je souhaite d'abord remercier mes directeurs de recherche, les professeurs Patrice Potvin et Martin Riopel, pour leur ouverture d'esprit, leur passion et leur intelligence. Bien des directeurs auraient hésité à diriger un projet de thèse en éducation impliquant l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Lors du début de cette thèse, la neuroéducation était encore inconnue au Québec et la faisabilité d'un projet comme celui proposé était, pour le moins qu'on puisse dire, incertain. Tout au long du parcours, ils m'ont dirigé avec cœur, intelligence et dévotion. Ces deux chercheurs sont des êtres d'exception. Je les remercie d'être qui ils sont. Merci également à mes directeurs de mémoire, Jesús Vázquez-Abad et Marie-Françoise Legendre. L'empreinte qu'ils ont laissée en moi m'a servi à chacune des étapes d'avancement du projet.

Par leur critique, leur intérêt et leur support, d'autres chercheurs ont contribué considérablement à cette thèse. Merci à Hélène Poissant, professeure à l'Université du Québec à Montréal (UQAM), de m'avoir intégré dans un projet de recherche impliquant l'IRMf, ce qui m'a permis de développer une connaissance technique de cet outil. Son esprit d'équipe est hors du commun. Merci à Kevin N. Dunbar, professeur à l'Université de Toronto, de m'avoir conseillé lors des premières étapes de l'élaboration de ce projet. Sans son travail de pionnier en neurodidactique des sciences, je ne crois pas que ce projet aurait eu lieu. Merci aussi aux autres professeurs qui m'ont accompagné dans mon parcours doctoral, en particulier Gilles Raïche, Jean Bélanger, Carmen Parent, Pauline Minier, Oury Monchi, Manon Théorêt, Louise Gaudreau et Michel Bélanger.

Un merci tout spécial à Lorie-Marlène Brault Foisy, une étudiante à la maîtrise en éducation ayant fait un travail remarquable lors du recrutement des

participants et de la collecte des données. Il faut le dire : l'effort de recrutement nécessaire à l'atteinte des objectifs de cette thèse a été considérable et Lorie-Marlène s'est avérée indispensable.

Merci à mes étudiants passionnés du cours *Introduction à la neuroéducation* de l'UQAM qui ont su me témoigner, à chaque cours, leur intérêt pour ce domaine en construction qu'est la neuroéducation. Merci à l'UQAM de m'avoir accordé le privilège de dispenser ce cours aux étudiants des cycles supérieurs.

Merci aussi aux membres l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal (IUGM) pour leur soutien lors de la collecte des données, en particulier André Cyr, ingénieur coordonnateur de l'UNF, et Carollyn Hurst, technologue en IRM.

Merci aux professeurs et chargés de cours ayant permis le recrutement de participants dans le cadre de leurs cours et, bien entendu, merci aux étudiants ayant participé à cette étude. Ils ont été d'une générosité remarquable.

Merci au FQRSC, au CRSH, à la Fondation de l'UQAM, ainsi qu'au Mouvement des caisses Desjardins pour leur soutien financier.

Merci finalement à ma famille et à mes enfants, Laurie-Anne et Émeric, pour leur intérêt envers mon projet. Leurs cerveaux en développement sont une source inépuisable de curiosité pour moi.

Dernier merci, et non le moindre, à ma conjointe, Valérie Leroux, pour ses commentaires toujours pertinents, son intérêt pour ce projet et, surtout, son soutien inconditionnel.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
RÉSUMÉ	x
INTRODUCTION	1
PROBLÉMATIQUE.....	3
<i>1.1 Pertinence sociale</i>	<i>4</i>
1.1.1 Rôle de l'école dans le développement de la culture scientifique.....	4
1.1.2 Problème de la résistance des conceptions inappropriées.....	6
<i>1.2 Pertinence scientifique.....</i>	<i>9</i>
1.2.1 Limites de nos connaissances actuelles sur le changement conceptuel	10
1.2.2 Avantages d'une approche neuroscientifique du changement conceptuel	12
1.2.3 Premiers résultats à vérifier.....	17
<i>1.3 Question de recherche.....</i>	<i>19</i>
CADRE THÉORIQUE	22
<i>2.1 Définitions et liens entre les concepts de changement conceptuel et de mécanisme cérébral.....</i>	<i>22</i>
2.1.1 Changement conceptuel.....	22
2.1.2 Mécanisme cérébral	30
2.1.3 Liens entre les concepts de mécanisme cérébral et de changement conceptuel	32
<i>2.2 Mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en sciences</i>	<i>36</i>
2.2.1 Mécanismes cérébraux liés au conflit cognitif.....	36
2.2.2 Mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage du raisonnement logique.....	40
2.2.3 Mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en mécanique	44
2.2.4 Mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en chimie	47
<i>2.3 Hypothèse de recherche</i>	<i>50</i>
2.3.1 Possible rôle de l'inhibition dans le changement conceptuel.....	50
2.3.2 Régions cérébrales liées à l'inhibition.....	51
2.3.3 Comparaison entre experts et novices pour étudier le changement conceptuel	53

2.3.4 Choix d'étudier l'expertise scientifique en électricité	55
MÉTHODOLOGIE.....	58
<i>3.1 Sujets.....</i>	<i>58</i>
3.1.1 Critères généraux de sélection	58
3.1.2 Critères de sélection des experts et des novices en sciences	58
3.1.3 Recrutement et le nombre de participants	59
<i>3.2 Instrumentation.....</i>	<i>62</i>
3.2.1 Choix de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle	62
3.2.2 Tâche cognitive demandée aux participants.....	63
<i>3.3 Déroulement.....</i>	<i>66</i>
3.3.1 Présentation des consignes et simulation	66
3.3.2 Acquisition des images	67
<i>3.4 Analyse des données.....</i>	<i>69</i>
3.4.1 Correction du mouvement	69
3.4.2 Normalisation	70
3.4.3 Lissage.....	70
3.4.4 Modèle linéaire général	71
<i>3.5 Considérations éthiques</i>	<i>74</i>
RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	75
<i>4.1 Résultats.....</i>	<i>75</i>
4.1.1 Résultats comportementaux	75
4.1.2 Résultats neurologiques.....	78
<i>4.2 Interprétation des résultats.....</i>	<i>85</i>
4.2.1 Expertise scientifique en électricité et fonctionnement du cerveau	85
4.2.2 Expertise scientifique en électricité et conceptions inappropriées	89
4.2.3 Expertise scientifique en électricité et inhibition	94
<i>4.3 Conséquences sur l'apprentissage et l'enseignement des sciences.....</i>	<i>101</i>
4.3.1 Changement conceptuel et élimination des conceptions inappropriées	101
4.3.2 Changement conceptuel et conservation des conceptions inappropriées.....	102
4.3.3 Changement conceptuel, développement de l'inhibition et enseignement des sciences	106
CONCLUSION	110
APPENDICE A - QUESTIONNAIRE UTILISÉ LORS DE LA SÉLECTION DES	
PARTICIPANTS.....	115

APPENDICE B - FORMULAIRE DE CONSENTEMENT.....	120
APPENDICE C - PROTOCOLE DÉTAILLÉ DES SÉANCES D'IRMF	130
APPENDICE D - CONSIGNES LIÉES À LA TÂCHE	133
RÉFÉRENCES	135

LISTE DES FIGURES

1.1 QUELQUES ÉLÉMENTS DE LA PROBLÉMATIQUE.	20
2.1 RÉSEAU LIANT LES CONCEPTS DE CHANGEMENT CONCEPTUEL ET DE MÉCANISME CÉRÉBRAL.	34
2.2 ÉTUDE DE FUGELSANG ET DUNBAR (2005) PORTANT SUR LE RÔLE DES CONCEPTIONS ANTÉRIEURES DANS LE TRAITEMENT DE L'INFORMATION.	38
2.3 ÉTUDE PORTANT SUR UNE ERREUR COURANTE DE RAISONNEMENT LOGIQUE. (TIRÉ DE HOUDÉ <i>ET AL.</i> 2000)	42
2.4 ÉTUDE PORTANT SUR L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE EN MÉCANIQUE (DUNBAR, FUGELSANG ET STEIN, 2007; PETTITO ET DUNBAR, 2004).	46
2.5 ÉTUDE PORTANT SUR L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE EN CHIMIE. (TIRÉ DE NELSON, LIZCANO ET DUNBAR, 2007)	49
3.1 APERÇU DE L'ANALYSE DES DONNÉES RÉALISÉE À L'AIDE DE SPM8.	69
4.1 RÉGIONS CÉRÉBRALES SIGNIFICATIVEMENT PLUS ACTIVÉES CHEZ LES EXPERTS ET LES NOVICES POUR LES DIFFÉRENTS TYPES DE STIMULI PRÉSENTÉS.....	81
4.2 RÉGIONS CÉRÉBRALES SIGNIFICATIVEMENT PLUS ACTIVÉES DANS UNE CONDITION PAR RAPPORT À UNE AUTRE.	84
4.3 COMPARAISON DES RÉSEAUX NEURONAUX DES EXPERTS ET DES NOVICES.....	100
4.4 DEUX TYPES DE MODÈLES DE CHANGEMENT CONCEPTUEL COMPATIBLES AVEC LES DONNÉES OBTENUES : LA COEXISTENCE ET L'INTÉGRATION.	103

LISTE DES TABLEAUX

1.1 PRINCIPAUX AVANTAGES D'UNE APPROCHE NEUROSCIENTIFIQUE DU CHANGEMENT CONCEPTUEL	15
3.1 PROFILS DES DEUX GROUPES DE PARTICIPANTS.	62
3.2 EXEMPLES DE STIMULI EN ÉLECTRICITÉ UTILISÉS DANS LA TÂCHE COGNITIVE.	65
3.3 PARAMÈTRES LIÉS À L'ACQUISITION DES IMAGES.	68
4.1 TAUX DE RÉUSSITE DES PARTICIPANTS POUR LES TROIS TYPES DE CIRCUITS ÉLECTRIQUES.	77
4.2 TEMPS DE RÉACTION DES PARTICIPANTS POUR LES TROIS TYPES DE CIRCUITS ÉLECTRIQUES.	77
4.3 RÉGIONS CÉRÉBRALES SIGNIFICATIVEMENT PLUS ACTIVÉES CHEZ LES EXPERTS ET LES NOVICES POUR LES DIFFÉRENTS TYPES DE STIMULI PRÉSENTÉS.	79
4.4 RÉGIONS CÉRÉBRALES SIGNIFICATIVEMENT PLUS ACTIVÉES DANS UNE CONDITION PAR RAPPORT À UNE AUTRE	83

RÉSUMÉ

Depuis au moins trente ans, les chercheurs étudient les conceptions erronées des élèves. Ces recherches ont montré que souvent ces derniers répondent de façon inappropriée à des questions portant sur différents phénomènes naturels. Ils affirment par exemple que les objets plus lourds tombent plus rapidement, qu'un seul fil électrique est suffisant pour allumer une ampoule et qu'il fait plus chaud l'été parce que le Soleil est plus près de la Terre. Si ces conceptions erronées n'étaient pas difficiles à changer, elles ne constitueraient pas un problème. Cependant, l'une des conclusions les plus solides de ce courant de recherche est que les conceptions sont difficiles à changer, ce qui pose tout un problème à l'enseignant en sciences dont un des buts est, précisément, de faire évoluer les conceptions de ses élèves.

Ce problème de la persistance des conceptions inappropriées a mené au développement d'un champ de recherche qu'on appelle le changement conceptuel. Selon ce champ, certains concepts scientifiques seraient difficiles à acquérir pour les élèves, non pas parce qu'ils sont intrinsèquement abstraits ou complexes, ni même parce qu'ils nécessitent la maîtrise d'outils mathématiques sophistiqués, mais parce qu'ils nécessitent un changement conceptuel. Aujourd'hui, même près de 30 ans après la publication du modèle du changement conceptuel de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982), modèle qui a jeté les bases à ce domaine de recherche, les processus en jeu dans le changement conceptuel demeurent mal connus. Plusieurs modèles d'apprentissage des sciences basés sur l'idée de la nécessité d'un changement conceptuel ont vu le jour, mais aucun n'a su faire l'objet d'un consensus. Ainsi, en 2011, il n'existe pas moins d'une dizaine de modèles différents du changement conceptuel. Dans certains cas, ces modèles se ressemblent ou se complètent, mais souvent, ils diffèrent et même s'opposent. Ce manque de connaissance sur la nature du changement conceptuel invite à davantage de recherches et, idéalement, des recherches utilisant de nouveaux outils.

La présente recherche utilise l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle dans le but d'obtenir de nouvelles connaissances sur les mécanismes cérébraux liés aux processus de changement conceptuel. Puisqu'il s'agit d'une des conceptions les plus fréquentes, cette recherche se concentre sur une conception répandue et difficile à changer selon laquelle un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule. Pour étudier les mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en électricité, des experts (étudiants du baccalauréat en physique) et des novices en sciences (étudiants d'un baccalauréat en sciences humaines) ont répondu à des questions liées à des circuits électriques simples à l'intérieur d'un appareil d'IRMf.

Les données permettent d'identifier quelles sont les régions cérébrales plus activées lors de la réalisation de cette tâche chez les experts et chez les novices.

Comme les experts sont familiers avec ce type de questions portant sur l'électricité, on pourrait s'attendre à ce que la tâche cognitive demandée ne soit pas exigeante et ne mobilise pas de façon importante leur cerveau. On pourrait également s'attendre à ce que la tâche soit plus difficile pour les novices et mobilise davantage certaines régions cérébrales. Pourtant, les résultats obtenus ne s'accordent pas avec cette hypothèse. Lorsqu'on leur présente des circuits électriques où une ampoule liée à une pile par un seul fil s'allume, les experts en sciences activent significativement plus que les novices différentes régions de leur cerveau, dont notamment le cortex préfrontal et le cortex cingulaire antérieur. Puisque ces régions sont reconnues pour jouer un rôle dans l'inhibition, ces résultats suggèrent que cette dernière joue un rôle dans l'expertise scientifique en électricité. Si tel est le cas, il se pourrait donc que les experts en sciences n'aient pas effacé de leur cerveau les conceptions inappropriées qu'ils possédaient peut-être avant leur formation scientifique, mais aient plutôt réussi à développer leur capacité d'inhiber (c'est-à-dire contrôler ou désactiver) ces conceptions pour arriver à répondre de manière scientifiquement correcte aux questions posées.

Le concept d'inhibition est actuellement peu utilisé dans les recherches en didactique des sciences et en éducation en général. Pourtant, ce concept pourrait éventuellement avoir des répercussions importantes sur l'apprentissage et l'enseignement des sciences. Par exemple, plusieurs modèles du changement conceptuel conçoivent ce dernier comme étant un processus par lequel les conceptions antérieures, ou les structures conceptuelles et épistémologiques qui les supportent, sont remplacées par de nouvelles. Nos résultats sont incompatibles avec ces modèles puisqu'il semble que le cerveau des experts conserve toujours (même après une formation scientifique poussée) la trace de ses conceptions antérieures puisqu'il doit encore les inhiber. Par contre, les résultats obtenus sont compatibles avec les modèles de changement conceptuel postulant qu'il existe une coexistence entre connaissances scientifiques et connaissances communes. Les résultats sont également compatibles avec les modèles stipulant que les conceptions scientifiques sont développées à partir de l'intégration et de la complexification d'éléments cognitifs élémentaires provenant des conceptions antérieures qui resteraient inchangées au cours du changement conceptuel. Ces conclusions ouvrent la porte à de nouvelles études visant à mieux comprendre de quelle façon l'inhibition peut être développée pour favoriser le changement conceptuel.

Mots clés : changement conceptuel, cerveau, inhibition, expertise scientifique, neuroéducation

INTRODUCTION

Depuis quelques années, une nouvelle approche de recherche en éducation émerge : la neuroéducation (Battro, Fischer et Léna, 2008; Fischer, Daniel, Immordino-Yang, Stern, Battro et Koizumi, 2007; Fischer 2009; Geake, 2004; Geake et Cooper, 2003; Goswami, 2004, 2006; Meltzoff, Kuhl, Movellan et Sejnowski, 2009; OCDE, 2002, 2007a; Stern, 2005). Contrairement aux recherches en neurosciences, dont le but est d'étudier le cerveau pour mieux le comprendre, les recherches en neuroéducation cherchent à étudier certains problèmes éducatifs à un niveau d'analyse inexploré en éducation : le niveau cérébral. Les recherches en neurosciences ont parfois des retombées en éducation, mais ces retombées sont souvent accidentelles ou secondaires, puisque les devis de recherche en neurosciences ne sont pas optimisés pour mieux comprendre un problème éducatif et mieux agir sur celui-ci, mais plutôt pour mieux comprendre le cerveau, son fonctionnement et son développement. La neuroéducation, au contraire, développe des devis qui sont optimisés pour répondre à des questions relevant directement du domaine de l'éducation. Les retombées possibles des recherches en neuroéducation, pour l'éducation, ne sont donc pas accidentelles; elles font plutôt partie intégrante des objectifs poursuivis.

La recherche présentée dans cette thèse s'inscrit dans cette approche neuroscientifique de recherche en éducation. Elle a pour but d'étudier un problème éducatif lié à l'apprentissage et à l'enseignement des sciences à partir de méthodes et de connaissances provenant des neurosciences cognitives. Le problème à l'étude est documenté depuis près de trente ans par la littérature de recherche en didactique des sciences : il s'agit de la persistance des conceptions erronées des élèves en sciences. À partir de techniques d'imagerie cérébrale développées en médecine et en

psychologie à la fin des années 1990, cette étude cherche à comprendre pourquoi certaines conceptions erronées des élèves sont difficiles à changer. La compréhension de ces difficultés et des mécanismes cérébraux qui les sous-tendent pourrait permettre aux enseignants en sciences de prendre des décisions éducatives plus éclairées et permettant de faciliter l'apprentissage de ces concepts scientifiques difficiles à acquérir pour les élèves.

Cette thèse comprend quatre chapitres. Le premier chapitre pose la problématique d'abord en présentant la pertinence sociale de s'intéresser aux problèmes liés à l'apprentissage des sciences, puis en traitant de la pertinence scientifique d'étudier l'apprentissage des sciences à partir d'outils comme l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) pour finir en énonçant la question de recherche. Dans le deuxième chapitre, qui porte sur le cadre théorique, les recherches ayant abordé directement ou indirectement la question de recherche sont discutées, ce qui mène à préciser les objectifs de la recherche et à formuler l'hypothèse de recherche. Le troisième chapitre présente la méthodologie suivie pour répondre aux objectifs de recherche. Enfin, le quatrième et dernier chapitre de la thèse présente les résultats comportementaux et neurologiques obtenus, en plus de discuter de l'interprétation des résultats et de ses retombées pour l'apprentissage et l'enseignement des sciences. La conclusion résume pour sa part les principaux résultats et présente quelques pistes pour des recherches subséquentes.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

Cette étude a pour but d'étudier l'apprentissage des sciences en ayant recours à l'imagerie cérébrale. Dans ce premier chapitre, la pertinence de la présente recherche est discutée. D'abord, la pertinence sociale s'appuie sur l'idée que pour bien jouer son rôle social dans le développement de la culture scientifique - culture qui est par ailleurs jugée essentielle à l'épanouissement de la société actuelle - l'école doit permettre aux élèves de maîtriser un certain nombre de concepts scientifiques jugés importants. Parmi ces concepts, certains se montrent particulièrement difficiles à acquérir, parce qu'ils nécessitent que les élèves réalisent ce que les chercheurs appellent un changement conceptuel. Pour soutenir l'école dans sa mission d'acculturation scientifique, il faut lui proposer des modèles d'apprentissage et d'enseignement afin qu'elle soit en mesure d'aider efficacement les élèves à surpasser cette difficulté, c'est-à-dire à réaliser des changements conceptuels.

La pertinence scientifique de cette recherche s'appuie sur le constat qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de modèles satisfaisants du changement conceptuel. En effet, bien que les chercheurs s'entendent sur l'importance des connaissances antérieures dans l'acquisition de nouveaux concepts et sur la difficulté de réaliser un changement conceptuel, ils ne s'entendent actuellement ni sur la nature, ni sur l'origine des connaissances antérieures des élèves et donc encore moins sur les processus impliqués dans le changement conceptuel. Cette absence de consensus amène d'ailleurs les chercheurs à étudier le changement conceptuel selon plusieurs perspectives (diSessa, 2006).

L'une de ces perspectives est particulièrement prometteuse : l'approche neuroscientifique. Cette dernière permet d'apporter un éclairage inédit aux processus liés à l'apprentissage des sciences, notamment en proposant de nouvelles méthodes d'investigation permettant l'étude de l'activité cérébrale de l'apprenant. Les premiers résultats d'une telle approche amènent à penser que l'inhibition, c'est-à-dire la capacité que possèdent certains neurones d'empêcher l'excitation des neurones voisins, joue peut-être un rôle clé dans les processus de changement conceptuel (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Pettito et Dunbar, 2004). Puisque ces résultats ne reposent encore que sur un nombre très limité d'études, il est souhaitable que de nouvelles études soient conduites pour (1) confirmer l'importance de l'inhibition dans les processus de changement conceptuel et (2) explorer quels sont les concepts scientifiques dont l'apprentissage nécessite une inhibition.

1.1 Pertinence sociale

Cette section présente la pertinence sociale du projet. Plus précisément, elle présente pourquoi la compréhension des processus liés au changement conceptuel est importante pour la société.

1.1.1 Rôle de l'école dans le développement de la culture scientifique

Puisque la science et la technologie jouent un rôle de plus en plus important dans la société actuelle (OCDE, 2007b), il devient primordial que les citoyens développent leur culture scientifique et technologique pour des raisons à la fois économiques, sociales et individuelles. Au niveau économique, la culture scientifique et technique de la population permet de stimuler la capacité d'innovation des entreprises, de faciliter l'accès à une main-d'œuvre compétente ayant les outils pour faire face aux défis de la formation continue et d'accroître la productivité et la compétitivité des entreprises (Conseil de la science et de la technologie, 2004). Au

niveau social, elle permet aux citoyens de mieux exprimer leurs besoins en matière de sciences et de technologie, ce qui contribue à mieux orienter les recherches dans ces domaines (Conseil de la science et de la technologie, 2004). Elle contribue aussi à rendre les citoyens aptes à contribuer de façon constructive aux débats actuels portant par exemple sur le clonage et l'énergie nucléaire. Au niveau individuel, une base de connaissances scientifiques et technologiques est essentielle pour décoder, comprendre et s'intégrer au monde d'aujourd'hui (Ministère de l'éducation, 2006). La culture scientifique et technologique facilite également l'accès à des outils essentiels au travail (tels que les logiciels et les autres technologies de l'information et des communications), ainsi que dans plusieurs sphères de la vie quotidienne (le choix des habitudes alimentaires et des comportements écoresponsables, par exemple). Bref, la culture scientifique et technologique de la population est un moteur de développement économique, un levier de participation démocratique du citoyen aux débats reliés à la science et à la technologie, en plus d'être un outil de développement personnel et professionnel (Conseil de la science et de la technologie, 2004).

Pour ces raisons, les citoyens composant la société actuelle ne peuvent plus faire l'économie d'une culture scientifique et technologique de base et il est plus que jamais nécessaire de mettre en place un environnement facilitant l'acquisition de cette culture. Parmi les milieux privilégiés de développement de la culture scientifique et technologique, on retrouve les médias (télévision, radio, Internet, etc.), les musées, les bibliothèques publiques de même que certains organismes à but non lucratif, mais aussi, et surtout, le milieu scolaire. En effet, comme le souligne le Conseil de la science et de la technologie du Québec (2004, p. 64), « l'école est reconnue comme le principal lieu de développement de la culture scientifique et technique ».

Pour que l'école joue pleinement son rôle dans l'acculturation scientifique de la population, elle doit notamment permettre aux élèves de maîtriser les concepts jugés essentiels à la compréhension des théories scientifiques (OCDE, 2007b). Or, s'il est vrai que les élèves arrivent souvent à résoudre les problèmes ou les exercices demandés lors des examens, cela ne signifie pas pour autant qu'ils comprennent bien les concepts et les théories scientifiques et qu'ils développent réellement leur culture scientifique. Les élèves peuvent en effet être capables de résoudre les problèmes et les exercices qu'on leur soumet en appliquant aveuglément des équations mathématiques et des algorithmes de résolution de problème (Gabel, Sherwood et Enochs, 1984; Lin, Hung et Hung, 2002; Nakhleh et Mitchell, 1993), tout en étant incapables de fournir une explication scientifiquement valable à des phénomènes relativement simples qui impliquent des raisonnements de nature plus qualitative.

1.1.2 Problème de la résistance des conceptions inappropriées

Bien que l'appropriation des concepts scientifiques soit essentielle au développement d'une culture scientifique, une imposante¹ littérature de recherche dans le domaine de l'apprentissage des sciences, et plus précisément dans le domaine de l'étude des conceptions des élèves, démontre que les concepts scientifiques sont souvent difficiles à maîtriser. En fait, ces recherches montrent que les élèves continuent souvent à adhérer - avant, pendant et même après l'enseignement - à des conceptions qui s'opposent souvent aux savoirs scientifiques que l'on tente de leur faire acquérir (Confrey, 1990; Liu, 2001; Wandersee, Mintzes et Novak, 1994).

¹ L'imposante bibliographie de Duit (2009) contenant près de 7 000 références sur les conceptions des

Ces conceptions auxquelles les élèves (ainsi que plusieurs adultes) adhèrent ont reçu différentes dénominations². Dans certains cas, les termes auront une connotation négative : préconceptions (Hashweh, 1988; Nussbain et Novick, 1982), conceptions préscientifiques (Good, 1991; Clement, 1993), fausses conceptions (Guzetti, Snyder et Glass, 1993), conceptions primitives (Potvin, 1998), conceptions naïves (Weller, 1995), etc. Dans d'autres cas, les termes ne mettront pas en relief le statut d'infériorité de la conception, mais plutôt son statut alternatif ou intuitif : conceptions des élèves (Confrey, 1990), conceptions alternatives (Millar, 1989), conceptions intuitives ou physique intuitive (diSessa, 1993), conceptions ou raisonnements spontanés (Viennot, 1979), etc. Un point est cependant commun à toutes ces perspectives : les différentes dénominations expriment, directement ou indirectement, l'idée qu'il existe une différence notable entre les conceptions des élèves et les conceptions à enseigner. Dans la présente recherche, les termes « conception inappropriée », « conception erronée » et autres dénominations seront utilisées indistinctement.

Une **conception inappropriée** est une conception qui contredit totalement ou partiellement³ les connaissances scientifiques que l'école cherche à enseigner. Elle peut prendre la forme d'un principe ou d'une idée mettant en relation quelques concepts; elle sert à la fois à expliquer et à prédire un ensemble de phénomènes naturels. Les conceptions inappropriées peuvent être exprimées explicitement par les élèves (« les objets les plus lourds tombent plus rapidement ») ou bien induites par le chercheur à partir de plusieurs explications ou prédictions formulées par l'élève. Par exemple, si un élève affirme qu'une balle en acier tombe plus rapidement qu'une

² Les auteurs cités utilisent, bien que n'en étant pas nécessairement à l'origine, la dénomination à laquelle ils sont ici associés.

³ Partiellement, parce qu'une conception peut-être en accord avec une conception scientifique dans certains contextes et en désaccord dans d'autres.

balle en mousse de polystyrène et qu'une brique tombe plus rapidement qu'une boîte de carton, le chercheur induira que l'élève possède une conception selon laquelle les objets les plus lourds tombent plus rapidement.

Malgré la diversité des dénominations et des approches, les recherches sur les conceptions inappropriées s'accordent sur certains points. Premièrement, **les élèves possèdent des conceptions inappropriées** (Confrey, 1990; Legendre, 2002; Liu, 2001; Wandersee, Mintzes et Novak, 1994) dans de nombreux domaines (Wandersee, Mintzes et Novak, 1994) comme la mécanique, l'électricité, la chimie, la biologie et la thermodynamique, et ce, même avant d'avoir reçu un enseignement formel sur ces sujets. Ces conceptions sont souvent très semblables chez les individus de différents âges et de différentes cultures (Wandersee, Mintzes et Novak, 1994). Deuxièmement, **elles sont difficiles à faire évoluer** (Confrey, 1990; Legendre, 2002; Liu, 2001; Wandersee, Mintzes et Novak, 1994). Il est en effet fréquent de constater que, malgré un enseignement formel des conceptions scientifiques, les élèves continuent à utiliser leurs conceptions inappropriées.

Les conceptions ne sont pas pour autant complètement rigides. En effet, au cours d'un apprentissage, il n'est pas rare de constater que les conceptions des élèves changent, puis retournent à leur état initial et changent de nouveau (Aufschnaiter et Rogge, 2010; Potvin et Thouin, 2003). Le problème, c'est que même après avoir temporairement changé au cours de l'apprentissage, les conceptions initiales reviennent, sous une forme similaire ou légèrement modifiée, comme si l'enseignement n'avait pas permis aux élèves une réelle remise en question de leurs conceptions initiales. Par exemple, malgré un enseignement formel de l'électricité, plus de 10 % des étudiants de deuxième année en ingénierie continuent à croire qu'un seul fil est nécessaire pour qu'une ampoule s'allume (Periago et Bohigas, 2005). Cette situation est encore plus prononcée dans l'étude de la physique mécanique où

plus de 25 % des étudiants de première année du baccalauréat en physique continuent à croire que les objets plus lourds tombent plus rapidement (Wandersee, Mintzes et Novak, 1994).

À la lumière de ces deux résultats empiriques (existence et persistance de conceptions erronées), l'on constate que l'apprentissage des sciences ne peut pas se réduire à une simple accumulation de connaissances. En effet, puisque les conceptions inappropriées interfèrent avec l'acquisition de nouvelles conceptions, l'apprentissage doit être plutôt conçu comme un processus lié à une évolution des conceptions. Dès lors qu'on définit ainsi l'apprentissage, la question qui se pose est : comment faire évoluer les conceptions des élèves? En raison du problème de la résistance des conceptions des élèves, cette question de nature pragmatique (puisque'elle vise à savoir *comment* faire évoluer les conceptions) renvoie à une question de nature plus fondamentale, question qui est centrale à la problématique de cette recherche : pourquoi les conceptions sont-elles si difficiles à faire évoluer? Trouver la réponse à cette question est une étape essentielle à l'amélioration de l'enseignement des sciences, enseignement qui favorise l'acculturation scientifique des élèves.

1.2 Pertinence scientifique

Après avoir montré dans la section précédente qu'il est difficile de développer une culture scientifique chez les élèves à cause du problème de la persistance des conceptions inappropriées, cette section présente la pertinence scientifique de la recherche, c'est-à-dire pourquoi il est nécessaire de mener de nouvelles études sur le changement conceptuel et pourquoi l'imagerie cérébrale constitue un outil intéressant pour mener à bien ces nouvelles recherches.

1.2.1 Limites de nos connaissances actuelles sur le changement conceptuel

Depuis la publication de l'article de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982), de nombreux chercheurs en apprentissage et en enseignement des sciences s'intéressent aux processus de changement conceptuel, c'est-à-dire aux processus par lesquels un individu passe d'une conception inappropriée à une conception plus appropriée d'un point de vue scientifique. Les nombreuses études portant sur le sujet ont permis de faire avancer considérablement notre compréhension de ce qu'est l'apprentissage des sciences. Elles ont notamment permis de cataloguer les conceptions fréquentes auxquelles les élèves adhèrent dans la plupart des domaines scientifiques et de mettre en évidence la persistance de ces conceptions. Elles ont également permis de souligner l'importance des connaissances antérieures dans l'acquisition de nouveaux savoirs. Grâce à une activité de recherche soutenue depuis près de trente ans, plusieurs modèles du changement conceptuel ont été proposés par les chercheurs pour expliquer la résistance des conceptions et pour développer des façons d'enseigner susceptibles de favoriser le changement conceptuel (Chi, 1992; diSessa, 1993; Johnston et Southerland, 2001; Larochelle et Désautels, 1992; Pintrich, 1993; Posner, Strike, Hewson et Gertzog, 1982; Vosniadou, 1994). Cependant, il existe encore plusieurs zones grises dans notre compréhension des processus de changement conceptuel. En voici quelques-unes.

Premièrement, les chercheurs ne s'entendent pas sur la structure et la fonction des connaissances antérieures dans les processus de changement conceptuel. Par exemple, selon le modèle des « cadres théoriques naïfs » (Vosniadou, 1994), les élèves possèdent des cadres théoriques bien établis et cohérents qui ne sont pas conformes aux savoirs scientifiques et qui engendrent, par conséquent, des conceptions inappropriées. Pour favoriser le changement conceptuel, il faut selon ce modèle amener l'élève à remettre en question son cadre conceptuel naïf. En opposition, le modèle de la « connaissance en pièces » (diSessa, 1993) affirme que les

élèves ne possèdent pas de théories bien organisées et qu'ils ne formulent pas leurs conceptions à partir de théories bien élaborées, mais plutôt à partir d'habitudes interprétatives intuitives et élémentaires. De ce point de vue, le changement conceptuel résulte davantage d'un changement d'habitudes interprétatives que d'une modification d'un cadre théorique naïf. Bien que ces deux modèles soient fondamentalement en opposition, il n'est aujourd'hui pas possible de savoir lequel de ces deux modèles explique le mieux les processus de changement conceptuel. Une recherche de diSessa, Gillespie et Esterly (2004) a d'ailleurs mis récemment en relief des résultats empiriques contradictoires qui montrent bien l'écart qui existe entre les deux modèles proposés : selon Vosniadou (2002), près de 90 % des élèves ont un cadre théorique naïf à propos du mouvement des objets, alors que la recherche de diSessa, Gillespie et Esterly (2004), avec une méthodologie comparable, prétend que seulement 17 % des élèves ont un cadre conceptuel naïf. Ce débat, pourtant lourd de conséquences pour l'enseignement des sciences (si Vosniadou a raison, il faut que l'enseignant tente de modifier la théorie naïve de l'élève, sinon il doit plutôt changer ses habitudes interprétatives), est donc encore loin d'être résolu.

Deuxièmement, à ce débat s'ajoute celui du choix de l'unité d'analyse qui devrait être privilégiée dans l'étude du changement conceptuel (diSessa, 2008; Potvin et Thouin, 2003). Dans un article publié en 2008, diSessa explique l'importance, pour arriver à un consensus sur la structure et la fonction des connaissances antérieures des élèves, de s'entendre d'abord sur l'objet d'études du changement conceptuel (conceptions ou entités sous-conceptuelles). Mais il n'y a actuellement aucun consensus à ce propos.

Les débats actuels portant sur la structure et la fonction des connaissances antérieures des élèves (Kaufman, Vosniadou, diSessa et Thagard, 2000; diSessa, Gillespie et Esterly 2004) et sur l'unité d'analyse que devraient privilégier les

chercheurs dans l'étude du changement conceptuel (diSessa, 2006; Potvin et Thouin, 2003) démontrent bien que nos connaissances sur le changement conceptuel sont encore incomplètes et qu'il est nécessaire de réaliser de nouvelles recherches dans ce domaine. diSessa (2006, p. 266, traduction libre) résume bien cet état de la recherche sur le changement conceptuel en affirmant que :

Actuellement, il n'y a, en fait, aucune théorie du changement conceptuel qui soit largement acceptée, bien articulée et testée. À la place, le champ du changement conceptuel est plutôt constitué d'une multitude de points de vue combinant beaucoup de sens commun et d'idées théoriques de façon kaléidoscopique.⁴

1.2.2 Avantages d'une approche neuroscientifique du changement conceptuel

Malgré une activité de recherche soutenue et malgré la diversité des approches utilisées par les chercheurs s'intéressant au changement conceptuel, il n'y a encore que très peu d'études faisant référence au cerveau. Des références à l'épistémologie, au constructivisme ou au cognitivisme sont souvent faites, mais rarement les travaux portant sur le changement conceptuel réfèrent aux neurosciences⁵.

L'une des raisons est sans doute la trop grande distance qui séparait, il y a quelques années, le domaine du changement conceptuel et celui des neurosciences. Alors que les neurosciences utilisent les concepts de neurone, de synapse et de potentiel d'action pour décrire le fonctionnement du cerveau, le champ d'études du changement conceptuel utilise plutôt des concepts comme ceux de conception et de changement conceptuel pour comprendre les processus en jeu dans l'acquisition du

⁴ « There are, in fact, no widely accepted, well-articulated, and tested theories of conceptual change. Instead, the field consists of multiple perspectives that combine many commonsense and theoretical ideas in kaleidoscopic fashion. »

⁵ Sauf les études de Dunbar (Fugelsang et Dunbar, 2005; Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Pettito et Dunbar, 2004; Nelson, Lizcano, Atkins et Dunbar, 2007).

savoir scientifique. L'écart entre les deux cultures et les deux langages est grand et il peut même être perçu comme étant trop grand. C'est du moins le point de vue énoncé par Bruer (1997, 2006), notamment dans un article intitulé *Education and the Brain : A Bridge Too Far* où il écrit : « Les applications éducatives des sciences du cerveau pourraient arriver éventuellement, mais, à l'heure actuelle [en 1997], la neuroscience n'a que peu de conseils pratique à offrir aux enseignants. » (Bruer, 1997, p. 4, traduction libre)⁶ Selon Bruer (2006), la psychologie cognitive est bien mieux placée, à l'heure actuelle, pour guider les pratiques pédagogiques à cause de ce « bridge too far ».

Grâce à l'émergence des neurosciences cognitives, l'écart entre neuroscience et éducation s'est considérablement réduit ces dernières années. À l'aide des nouvelles technologies d'imagerie cérébrale, les neuroscientifiques de la cognition sont maintenant en mesure d'étudier les régions du cerveau qui s'activent lors de la réalisation de tâches cognitives. Comme les neurones accomplissant une même fonction ont tendance à être regroupés dans le cerveau (ce que les neuroscientifiques nomment la localisation ou spécialisation fonctionnelle; Ward, 2010), l'activité cérébrale de différentes régions du cerveau peut être corrélée avec certaines des fonctions cognitives reliées, par exemple, à la vision, au langage et à la mémoire. Ainsi, la neuroscience cognitive rapproche la neuroscience et le domaine de l'éducation en faisant le lien entre le niveau cérébral (neurone, synapse, potentiel d'action) et le niveau cognitif (conceptions des élèves).

Si les chercheurs s'intéressant au changement conceptuel n'ont jamais fait référence au cerveau auparavant, c'est sans doute parce qu'ils n'avaient ni les outils théoriques (ce que la neuroscience cognitive offre aujourd'hui), ni tous les outils

⁶ « Educational applications of brain science may come eventually, but as of now neuroscience has little to offer teachers in terms of informing classroom practice. »

méthodologiques (ce que l'imagerie cérébrale permet maintenant). De nouvelles méthodes de recherche basées sur l'imagerie cérébrale rendent aujourd'hui possible ce qui ne l'était pas il y a quelques années. L'idée de fonder une neurodidactique des sciences (c'est-à-dire un domaine qui étudie les problèmes liés à l'apprentissage et l'enseignement des sciences à un niveau d'analyse qualifié de cérébral) est aujourd'hui non seulement réalisable, mais aussi pertinente.

Plusieurs arguments militent en faveur d'une approche neuroscientifique du changement conceptuel comme l'illustre le tableau 1.1. D'abord, l'approche neuroscientifique permet d'ajouter un niveau d'analyse (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Geake, 2003; Geake et Cooper, 2003; Pettito et Dunbar, 2004) à l'étude des processus de changement conceptuel, un niveau qui se situe entre le niveau conceptuel (étude des conceptions des élèves) et le niveau cellulaire (étude des neurones). L'approche neuroscientifique ne s'inscrit pas en opposition aux recherches antérieures, mais en complémentarité en proposant un nouveau niveau d'analyse. En plus d'ouvrir sur de nouvelles connaissances, l'accession à un tel niveau permet aussi d'apporter un nouvel éclairage sur les résultats de recherche existants.

Tableau 1.1 Principaux avantages d'une approche neuroscientifique du changement conceptuel.

Ajout d'un niveau d'analyse	Une approche neuroscientifique du changement conceptuel permet d'ajouter un niveau d'analyse à l'étude des processus de changement conceptuel (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Geake, 2003; Geake et Cooper, 2003; Pettito et Dunbar, 2004).
Ajout d'une variable dépendante	Une approche neuroscientifique du changement conceptuel permet aux chercheurs d'accéder à une variable dépendante supplémentaire, soit celle de l'activité cérébrale. Henson (2005) a formulé cet argument pour justifier l'inclusion de la neuroscience en psychologie cognitive, mais son raisonnement s'applique aussi à la neurodidactique des sciences.
Ajout d'une méthodologie	Une approche neuroscientifique permet d'étudier le changement conceptuel à l'aide d'une méthodologie inédite, ce qui peut mener à de nouvelles connaissances et permettre de trianguler les résultats obtenus grâce à d'autres approches.
Étude des contraintes biologiques	Une approche neuroscientifique du changement conceptuel permet d'étudier les contraintes biologiques relatives aux processus de changement conceptuel. Cet argument, formulé entre autres par Ward (2010), vise également à justifier l'inclusion de la neuroscience en psychologie cognitive, mais son raisonnement s'applique aussi à la neurodidactique des sciences.

En plus d'offrir un niveau d'analyse supplémentaire, l'approche neuroscientifique en éducation permet au chercheur intéressé par la cognition d'accéder à une variable dépendante supplémentaire : l'activité cérébrale impliquée dans la réalisation de tâches cognitives (Henson, 2005). En plus des données comportementales traditionnellement recueillies par les recherches en éducation (comme les réponses des élèves, le temps d'exécution d'une tâche, etc.), l'approche neuroscientifique met à la portée du chercheur intéressé au changement conceptuel des données cérébrales reliées à l'apprentissage des sciences. Si, par exemple, un chercheur s'intéresse aux processus de changement conceptuel en physique mécanique, il peut vérifier, à l'aide d'un questionnaire, les réponses données par les élèves au sujet de la chute au sol d'objets légers et d'objets lourds. Il peut aussi mener des entrevues afin de mieux comprendre pourquoi les élèves ont répondu de telle ou telle façon. Grâce à l'imagerie cérébrale, il peut désormais explorer une variable

supplémentaire, soit celle de l'activité cérébrale sous-jacente à la réalisation de tâches cognitives reliées à la chute des objets, par exemple.

L'accession à cette nouvelle variable qu'est l'activité cérébrale est également intéressante du point de vue méthodologique et épistémologique. En effet, jusqu'à présent, les recherches portant sur le changement conceptuel se sont essentiellement appuyées sur des méthodologies permettant de recueillir des données comportementales. L'utilisation de l'imagerie cérébrale repose sur une méthodologie inédite qui est susceptible, non seulement de mener à de nouvelles connaissances, mais aussi de permettre de trianguler les résultats obtenus grâce à d'autres approches.

Finalement, une autre raison d'étudier le changement conceptuel sous un angle neuroscientifique est que le cerveau impose des contraintes sur la façon dont le traitement de l'information s'effectue (Ward, 2010) et qu'il est essentiel de tenir compte de ces contraintes pour modéliser correctement les processus de changement conceptuel. Lorsque les chercheurs étudient les conceptions des élèves et les processus liés au changement conceptuel, ils cherchent à comprendre de quelles façons les élèves utilisent leurs connaissances antérieures pour répondre à une question ou résoudre un problème et de quelles façons ces connaissances antérieures peuvent être modifiées. Or, puisque tout ce processus de traitement de l'information (entendre ou lire le problème, décoder le sens de la question, utiliser ses connaissances pour proposer des solutions et formuler une réponse) se produit au niveau biologique, dans le cerveau, il est essentiel de tenir compte de ces contraintes et seule une approche neuroscientifique de recherche peut le faire directement.

Placés devant ces arguments, depuis quelques années, certains organismes dont l'OCDE (2007b) et The Royal Society (2011), ainsi qu'un nombre grandissant de chercheurs en éducation (Geake, 2003, 2004; Geake et Cooper 2003; Goswami,

2004, 2006) et en neuroscience cognitive (Houdé, 2006; O'Boyle et Gill, 1998; Pettito et Dunbar, 2004) encouragent et contribuent au développement d'une approche neuroscientifique de recherche en éducation. Notre projet de recherche s'inscrit dans ce vaste et récent mouvement et propose de développer une approche neuroscientifique de la didactique des sciences et, plus particulièrement, du champ de recherche portant sur le changement conceptuel.

1.2.3 Premiers résultats à vérifier

En plus des raisons de nature épistémologique discutées dans la section précédente, l'approche neuroscientifique de l'étude du changement conceptuel est intéressante parce qu'elle apporte déjà, malgré son émergence récente, des informations inédites sur les processus en jeu dans le changement conceptuel.

Jusqu'à présent, seulement trois études reposent sur une approche neuroscientifique du changement conceptuel : une étude complète qui ne porte pas explicitement sur l'apprentissage des sciences, mais dont les résultats sont intéressants pour le domaine de recherche du changement conceptuel (Fugelsang et Dunbar, 2005) et deux études pilotes portant explicitement sur l'étude neuroscientifique du changement conceptuel (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Nelson, Lizcano, Atkins et Dunbar, 2007).

Les résultats de la première étude (Fugelsang et Dunbar, 2005) questionnent la pertinence d'une des approches d'enseignement les plus populaires pour favoriser le changement conceptuel : le conflit cognitif. Les résultats de la seconde (Pettito et Dunbar, 2004; Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007) remettent en question notre conception de la nature même du changement conceptuel en introduisant le concept d'inhibition. Les résultats de la troisième mettent en lumière le rôle du cortex

préfrontal dans les processus de changement conceptuel. Une description détaillée de ces études est présentée à la section 2.2.

Bien qu'absent de la littérature de recherche portant sur le changement conceptuel, le concept d'inhibition avait déjà été pressenti par le philosophe des sciences Bachelard (1938). Selon ce dernier, le développement de la pensée scientifique ne peut se réaliser qu'au prix d'une importante lutte contre les habitudes naturelles de la pensée. Certains didacticiens français (dont Astolfi et Peterfalvi, 1997) se sont inspirés de Bachelard et de l'idée selon laquelle les habitudes naturelles de la pensée constituent des obstacles à l'apprentissage des sciences. Cependant, aucun à notre connaissance n'a jusqu'à présent établi de liens directs entre les habitudes naturelles de la pensée et le cerveau des élèves, ni fait référence à l'inhibition comme un mécanisme possible pouvant expliquer comment surmonter ces habitudes.

En introduisant le concept d'inhibition, ces trois études ouvrent la porte à une interprétation inédite des processus en jeu dans le changement conceptuel, ce qui pourrait avoir des incidences importantes non seulement sur notre façon de concevoir l'apprentissage des sciences, mais aussi sur les méthodes d'enseignement à privilégier pour favoriser le changement conceptuel. En effet, ce dernier est habituellement perçu comme un processus complexe et difficile qui nécessite l'abandon ou la restructuration majeure du système de connaissances de l'individu. Dans cette façon de concevoir le changement conceptuel, l'une des stratégies d'enseignement les plus répandues consiste à placer l'apprenant dans une situation de conflit cognitif, une situation qui l'amène à rejeter ses connaissances antérieures, puis à construire un système de connaissances plus valable du point de vue scientifique. Les recherches émergentes en neurodidactique des sciences proposent qu'un autre processus pourrait être en jeu : réaliser un changement conceptuel serait en fait apprendre à inhiber (c'est-à-dire contrôler ou désactiver) les réseaux neuronaux menant à la formulation

de réponses inappropriées. Il ne s'agirait donc pas « d'effacer » ou de restructurer de façon approfondie les réseaux neuronaux en place, mais plutôt d'apprendre à inhiber ceux menant à la formulation de réponses inappropriées. Si cette hypothèse du rôle de l'inhibition dans les processus de changement conceptuel s'avère fondée, cela pourrait ouvrir la porte à un domaine de recherche complètement nouveau qui étudierait les facteurs favorisant l'inhibition des conceptions inappropriées.

Bien que des plus intéressants, les résultats de ces trois études sont cependant fragmentaires et beaucoup de travail reste encore à accomplir pour mieux comprendre les mécanismes cérébraux en lien avec le changement conceptuel. D'abord, la seule étude évaluée par un comité d'experts indépendants et publiée dans une revue scientifique est celle de Fugelsang et Dunbar (2005) portant sur le conflit cognitif. Les deux autres études (en mécanique et en chimie) ont uniquement été diffusées dans le cadre de congrès (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Nelson, Lizcano, Atkins et Dunbar, 2007) et d'un chapitre de livre (Pettito et Dunbar, 2004). Ensuite, comme ces deux dernières études n'ont pas fait l'objet d'une publication formelle, nous ne connaissons que très peu les détails quant à la méthodologie employée et le type d'analyse effectuée sur les données. Par conséquent, il est très difficile d'évaluer la valeur scientifique de ces deux recherches.

1.3 Question de recherche

La figure 1.1 schématise et résume les principaux éléments de la problématique de la présente recherche. Tel que discuté précédemment, le développement de la culture scientifique chez les élèves est essentiel au maintien et au développement de la société actuelle. Mais, puisque le développement de la culture scientifique nécessite l'apprentissage de concepts et de théories scientifiques et que cet apprentissage est difficile à obtenir à cause des conceptions non scientifiques que possèdent les élèves, mieux comprendre pourquoi les conceptions

des élèves sont si difficiles à faire évoluer et comment s'effectuent les processus de changement conceptuel deviennent des enjeux sociaux importants.

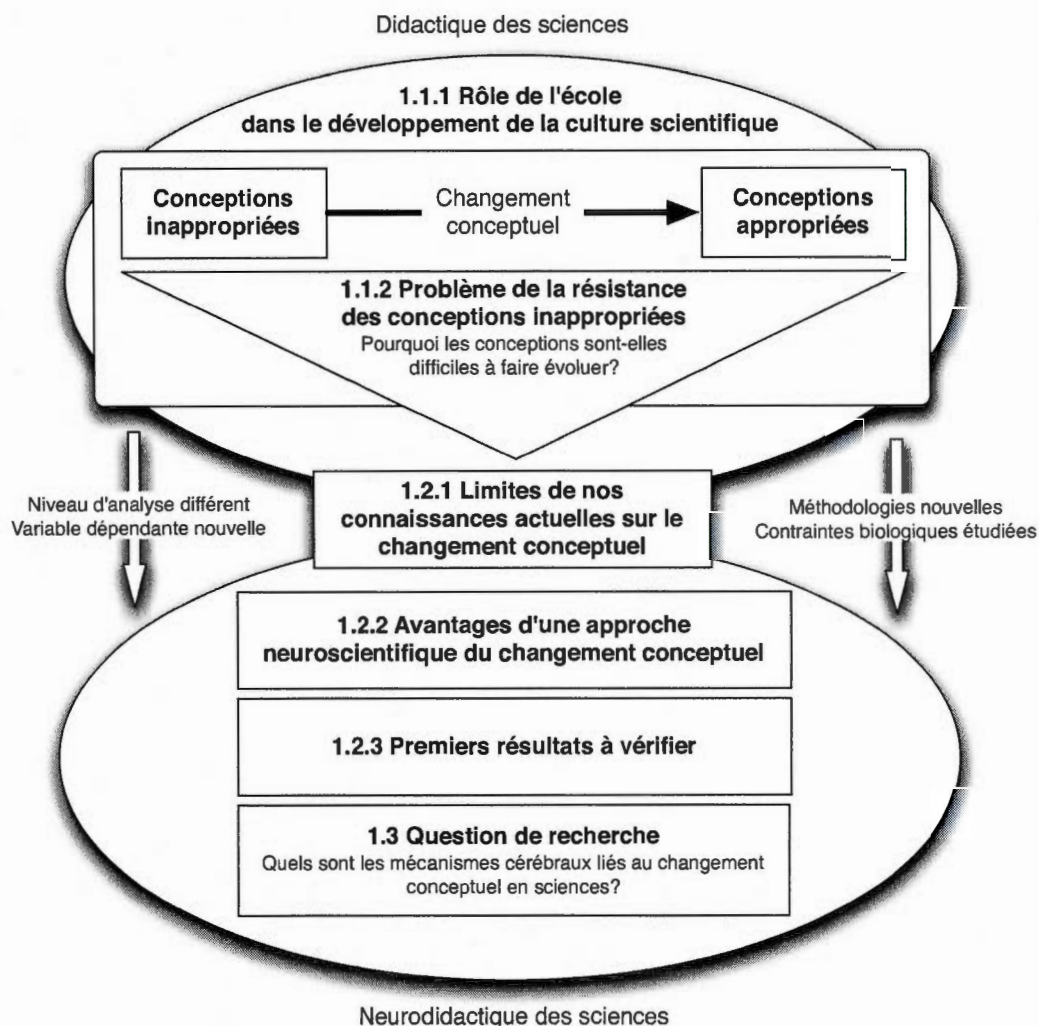


Figure 1.1 Quelques éléments de la problématique.

Bien que de nombreux chercheurs se soient penchés sur cette question, les mécanismes en jeu dans le changement conceptuel sont encore mal connus. Parce qu'elle permet d'accéder à un autre niveau d'analyse et d'ajouter une variable dépendante supplémentaire à l'étude du changement conceptuel, parce qu'elle se

fonde sur une méthodologie différente et parce qu'elle tient compte des contraintes biologiques auxquelles est soumis tout apprenant, l'approche neuroscientifique semble une perspective de recherche prometteuse dans l'étude du changement conceptuel. Les résultats préliminaires des recherches en neurodidactique des sciences le montrent bien en proposant déjà un concept nouveau dans l'étude du changement conceptuel : l'inhibition.

* * *

La présente recherche propose d'étudier le changement conceptuel au niveau cérébral, c'est-à-dire de chercher à comprendre les mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage de conceptions scientifiques. La question de recherche est : quels sont les mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en sciences? Des questions et des hypothèses de recherche spécifiques sont présentées à la fin du deuxième chapitre portant sur le cadre théorique.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

Après avoir défini les concepts de changement conceptuel et de mécanisme cérébral - concepts clés de la question de recherche posée à la fin du chapitre précédent - et avoir fait état des liens qui les unissent, ce chapitre présente une revue des études abordant, directement ou indirectement, la question de recherche. Cette revue mène à la formulation, à la fin du chapitre, de l'hypothèse selon laquelle l'inhibition joue peut-être un rôle dans l'apprentissage des sciences.

2.1 Définitions et liens entre les concepts de changement conceptuel et de mécanisme cérébral

Deux concepts sont mentionnés dans la question de recherche « Quels sont les mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en sciences? », soit celui de changement conceptuel et celui de mécanisme cérébral. Comme ces deux concepts se situent traditionnellement dans des perspectives de recherche différentes (neuroscience pour le concept de mécanisme cérébral et éducation pour celui de changement conceptuel) et à des niveaux d'analyse différents (le niveau cérébral et le niveau conceptuel, cognitif ou symbolique), il apparaît essentiel d'explicitier les liens les unissant.

2.1.1 Changement conceptuel

À cause de la diversité des perspectives de recherche, le concept de changement conceptuel est polysémique et difficile à définir (diSessa, 2006). C'est pour cette raison que, dans cette section, ce concept est d'abord défini en insistant sur les éléments faisant l'objet d'un certain consensus (malgré la diversité des approches)

chez les chercheurs et sur ce qui fait la pertinence et l'originalité du concept. Ensuite, la diversité des approches et des points de vue est présentée en analysant quelques définitions qui précisent la nature de ce qui évolue chez l'apprenant lorsqu'il réalise un changement conceptuel.

2.1.1.1 Éléments consensuels

Les recherches sur les conceptions des élèves en sciences ont montré que ces derniers formulent souvent des réponses non scientifiques à des questions de nature conceptuelle ou qualitative (c'est-à-dire qui n'impliquent pas l'utilisation d'équations mathématiques) et que ces réponses (inappropriées) sont très difficiles à modifier, malgré un enseignement formel et un renforcement des « bonnes réponses » (Confrey, 1990; Legendre, 2002; Liu, 2002; Wandersee, Mintzes et Novak, 1994). À cause de la nature du problème de la résistance de ces réponses inappropriées et de l'inefficacité des techniques de renforcement classiques, les chercheurs du domaine du changement conceptuel ont mis à l'écart les modèles d'apprentissage offerts par le béhaviorisme. En fait, les recherches sur le changement conceptuel s'inscrivent en continuité avec les travaux de Piaget (diSessa, 2006; Legendre, 2002; Posner, Strike, Hewson et Gertzog, 1982), parce que (1) le domaine du changement conceptuel étudie l'apprentissage des sciences dans une perspective constructiviste selon laquelle les nouveaux savoirs sont construits à partir des connaissances antérieures de l'apprenant et (2) la distinction entre l'assimilation et l'accommodation est l'un des fondements des modèles du changement conceptuel (Posner, Strike, Hewson et Gertzog, 1982).

Chez tous les chercheurs, le changement conceptuel réfère à des apprentissages qui sont difficiles à réaliser et qui nécessitent plus qu'un simple travail de mémorisation, d'entraînement ou de renforcement :

Au sein des sciences de l'apprentissage, le changement conceptuel se définit probablement mieux par son importance et sa pertinence pour l'éducation. À l'intérieur de l'ensemble de l'expérience éducative, certains sujets semblent être systématiquement extrêmement difficiles pour les élèves. L'apprentissage de ces sujets est problématique et les méthodes conventionnelles d'enseignement s'avèrent défaillantes. Plusieurs sujets en sciences, de l'école primaire à l'université, ont ces caractéristiques dont, en physique, les concepts de matière et densité, la mécanique newtonienne, l'électricité et la relativité; en biologie, l'évolution et la génétique. Pour apprendre ces sujets, les élèves doivent réaliser un changement conceptuel. (diSessa, 2006, p. 265, traduction libre)⁷

Pour Carey (1988), par exemple, il existe deux types de restructuration de la connaissance, la faible restructuration et la forte. Le changement conceptuel ne concerne que les changements nécessitant une forte restructuration. Pour Gentner *et al.* (1997) qui distinguent quant à eux trois types de changement (révision des croyances, changement de théorie et changement conceptuel), le changement conceptuel concerne également le type de changement le plus difficile à réaliser.

L'expression « changement conceptuel » peut mener à une mauvaise interprétation. Elle est formée de deux termes juxtaposés. Le premier, celui de changement, réfère à une modification que subit quelque chose qui existait préalablement. Le deuxième qualifie de « conceptuel » la nature du changement, c'est-à-dire que le changement conceptuel réfère à une modification que subissent les conceptions antérieures des élèves. Cela laisse donc entendre que ce qui change au cours du changement conceptuel, ce sont les conceptions. Or, cette affirmation ne s'accorde pas avec plusieurs des modèles du changement conceptuel (voir prochaine section) :

⁷ « Within the learning sciences, conceptual change is probably best defined by its relevance to instruction. In the broad education experience, some topics seem systematically to be extremely difficult for students. Learning and teaching in the areas are problematic and present persistent failures of conventional methods of instruction. Many areas in the sciences, from elementary school through university level, have this characteristic, including, in physics, concepts of matter and density, Newtonian mechanics, electricity and relativity; in biology, evolution and genetics. To learn such topics, students must go through a conceptual change. »

La partie « conceptuel » dans l'expression changement conceptuel doit être traitée moins littéralement. Diverses théories localisent les difficultés des élèves dans des entités comme les « croyances », les « théories » ou les « ontologies », en plus des « concepts ». (diSessa, 2006, p. 265, traduction libre)⁸

Par exemple, pour Potvin et Thouin (2003), ce ne sont pas simplement les conceptions qui changent lors du changement conceptuel, puisqu'elles ne seraient que les symptômes visibles de modifications se situant à un niveau plus fondamental.

2.1.1.2 Diversité des points de vue

Puisque les chercheurs étudiant le changement conceptuel s'inscrivent plutôt dans une perspective constructiviste de l'apprentissage, le problème de la persistance des conceptions inappropriées renvoie à la question : qu'est-ce qui doit changer à l'« intérieur » des élèves pour qu'un stimulus (une question conceptuelle) n'engendre plus la même (fausse) réponse? À ce propos, il n'y a pas de consensus et les chercheurs présentent de nombreux points de vue.

Pour certains auteurs, ce sont les conceptions qui changent au cours d'un changement conceptuel. L'un des premiers modèles du changement conceptuel - et l'un des plus cités - est celui de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982), qui pose la question : de quelle façon les conceptions des élèves changent-elles en présence de nouvelles idées et de nouvelles informations? Selon ce modèle, le changement conceptuel est un changement qui concerne directement les conceptions⁹ :

⁸ « The “conceptual” part of the conceptual change label must be treated less literally. Various theories locate the difficulty in such entities as “beliefs”, “theories”, or “ontologies” in addition to “concept”. »

⁹ Même si Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982) définissent le changement conceptuel comme étant un changement de conception, cela ne signifie pas pour autant que ces chercheurs croient que le changement conceptuel ne dépend pas d'éléments qui se situent à un autre niveau que celui des conceptions proprement dites. La notion d'écologie conceptuelle proposée par ces chercheurs montre bien d'ailleurs que le modèle proposé est plus complexe. Il est cité ici à titre d'exemple seulement.

La question à laquelle notre théorie initiale du changement conceptuel était une réponse est : « Comment les apprenants passent-ils d'une conception, C_1 , à une conception, C_2 ? » Nous utilisons le terme *conception* pour marquer la pluralité et la complexité interne des objets de changement et pour les distinguer du terme *concept* tel qu'utilisé dans le discours courant. (Strike et Posner, 1992, p. 148, traduction libre)¹⁰

Pour d'autres auteurs, c'est la structure conceptuelle qui change. Le modèle de Duit et Treagust (2003) postule, par exemple, que les conceptions des élèves se situent à l'intérieur d'une structure conceptuelle composée d'un ensemble de concepts fortement interreliés. Ce qui doit changer, ce ne sont donc pas simplement les conceptions, mais également l'ensemble de la structure conceptuelle qui les soutient et les supporte. Le changement conceptuel est difficile à réaliser parce qu'il ne suffit pas de changer de conceptions, il faut changer de structure conceptuelle :

Nous utilisons le terme changement conceptuel pour désigner les apprentissages dans des domaines où les structures conceptuelles préexistantes des apprenants doivent être fondamentalement restructurées dans le but de permettre l'acquisition des concepts scientifiques à l'étude. (Duit et Treagust, 2003, p. 673, traduction libre)¹¹

Alors que le modèle de Duit et Teagust (2003) affirme que ce qui change, c'est la grande structure conceptuelle formée de plusieurs concepts, Chi (1992) affirme que ce qui change, ce sont les définitions des concepts. Les deux modèles ne sont pas nécessairement en opposition parce que, pour changer de concepts, il faut parfois le redéfinir dans le cadre d'une structure conceptuelle différente, ce qui

¹⁰ « The question to which our initial theory of conceptual change was an answer is: "How do learners make transition from one conception, C_1 , to a successor conception, C_2 ." We use the word *conception* to mark the plurality and internal complexity of the objects of change, and to distinguish it from the term *concept* as used in normal discourse. »

¹¹ « Rather, we use the term conceptual change for learning in such domains where the pre-instructional conceptual structures of the learners have to be fundamentally restructured in order to allow understanding of the intended knowledge, that is, the acquisition of science concepts. »

implique une modification au niveau de la structure. Les deux modèles ne se situent pas à un même niveau d'analyse, mais ils ne sont pas pour autant en opposition. Selon Chi (1992), un changement conceptuel arrive lorsque la signification d'un concept est modifiée, c'est-à-dire lorsqu'un concept change de catégorie :

La définition opérationnelle et simple utilisée dans cet essai portant sur le changement conceptuel est que ce dernier réfère essentiellement à la façon dont les concepts changent de signification. Puisque le changement de signification est difficile à décrire, on peut le concevoir comme un changement de catégorie à laquelle un concept appartient. (Chi, 1992, p. 129, traduction libre)¹²

Pour Vosniadou (1994), il est important de situer la notion de changement conceptuel à un autre niveau que celui des concepts, parce que les conceptions, les structures conceptuelles et les concepts sont enchâssés dans une plus large structure théorique qui les intègre. Cette large structure, qui forme un « cadre théorique naïf », n'est pas constituée de concepts - comme c'est le cas pour la notion de structure conceptuelle de Duit et Treagust (2003) - mais de prépositions ontologiques et épistémologiques construites tôt lors de l'enfance. Pour Vosniadou, le changement conceptuel le plus difficile à réaliser est celui qui implique un changement au niveau de ces présuppositions ontologiques et épistémologiques¹³ :

Une révision au niveau du cadre théorique est le type de changement conceptuel le plus difficile à réaliser et le plus probable de causer des fausses conceptions. Les conceptions erronées sont perçues comme des tentatives pour interpréter des informations scientifiques à l'intérieur d'un cadre théorique préexistant qui

¹² The simple working definition adopted in this essay for conceptual change is that it refers primarily to the notion of how a concept can change its meaning. Since a difference in meaning is difficult to define, one can think of it as a change in its categorical status: That is, changing the category to which the concept is assigned, since all concepts belong to a category.

¹³ Il est question ici du « changement conceptuel le plus difficile à réaliser », parce que, pour Vosniadou, il existe un deuxième type de changement conceptuel, soit celui qui implique seulement l'enrichissement du cadre théorique existant par de nouvelles informations et non une révision de ce cadre.

contient des informations en contradiction avec le savoir scientifique. (Vosniadou, 1994, p. 46, traduction libre)¹⁴

Contrairement à Vosniadou, diSessa (1993) pense plutôt que les réponses non scientifiques formulées par les élèves ne découlent pas nécessairement de théories naïves; elles peuvent provenir d'une utilisation inadéquate de règles ou d'outils cognitifs intuitifs et sous-conceptuels : les primitives phénoménologiques (p-prims). Au cours des processus de changement conceptuel, l'utilisation que fait l'apprenant d'une p-prim ou d'un ensemble de p-prims change parce que l'élève développe progressivement, selon diSessa (1998), des classes de coordination, c'est-à-dire des systèmes complexes incluant de nombreux éléments coordonnés, dont les p-prims (diSessa, 2006, p. 275). De ce point de vue, le changement conceptuel est un processus par lequel un individu passe d'une utilisation intuitive de p-prims à une utilisation systématique et sous-tendue par tous les éléments organisés d'une classe de coordination - ce qui revient à dire, en résumé, que le changement conceptuel est un processus par lequel l'individu développe une classe de coordination plus conforme au savoir scientifique.

Finalement, pour certains chercheurs (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Nelson, Lizcano, Atkins et Dunbar, 2007; Pettito et Dunbar, 2004), le changement conceptuel est le résultat d'une modification se situant au niveau du cerveau. Lorsqu'un individu apprend, ses connexions neuronales se modifient. Certaines connexions peuvent être créées, certaines peuvent se défaire, alors que d'autres peuvent être renforcées ou atténuées. Cette propriété que possède le cerveau à modifier ses connexions neuronales se nomme la plasticité. Ce courant d'études

¹⁴ « Revision at the level of the framework theory is considered to be the most difficult type of conceptual change and the most likely to cause misconceptions. Misconceptions are viewed as student's attempts to interpret scientific information within an existing framework theory that contains information contradictory to the scientific view. »

postulant que le changement conceptuel provoque des modifications cérébrales observables à l'aide de techniques d'imagerie cérébrale est actuellement en émergence (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007). Ces études proposent notamment d'étudier les différences entre les activités cérébrales des novices et des experts lors de l'exécution de tâches cognitives reliées aux sciences. Le but de ces recherches est d'étudier les mécanismes cérébraux qui expliquent de quelle façon un scientifique novice devient un scientifique expert. Le concept de mécanisme cérébral est central à ce type d'études et c'est pourquoi une analyse de ce concept sera présentée dans la section suivante.

2.1.2 Mécanisme cérébral

Cette section définit le concept de mécanisme cérébral, ce qui permettra ensuite d'établir des liens entre ce concept et celui de changement conceptuel. Contrairement aux publications portant sur le changement conceptuel, aucune des publications consultées dans le domaine des neurosciences - qu'il s'agisse de documents de références, de livres scolaires ou d'articles de recherche - ne définit explicitement la notion de mécanisme cérébral. Ce terme est pourtant omniprésent dans les ouvrages publiés en neurosciences, en plus d'être l'un des plus importants éléments du paradigme sous-tendant l'activité de recherche des neurosciences (Bechtel, 2001). Pour procéder à l'analyse conceptuelle présentée dans cette section, les définitions du concept de mécanisme dans les travaux émergents (Revonso, 2001) en philosophie des neurosciences sont utilisées. Après avoir identifié les caractéristiques qui font qu'un mécanisme est effectivement un mécanisme, une définition de mécanisme cérébral est proposée.

2.1.2.1 Concept de mécanisme

Le concept de mécanisme est souvent associée à une approche de recherche dont le but est d'expliquer un phénomène en décrivant ce qui, au niveau interne, produit ce phénomène. Par exemple, en génie, un mécanisme décrit, au niveau interne, ce qui fait qu'une machine accomplit une certaine tâche. En chimie, la notion de mécanisme explique ce qui survient au niveau moléculaire pour qu'un mélange de produits provoque une réaction chimique. En neurosciences, la notion de mécanisme réfère également à l'idée qu'un phénomène observable (ce que fait le mécanisme) peut résulter d'événements se déroulant au niveau interne :

Certains chercheurs, cependant, ne souhaitent pas seulement découvrir ces lois, mais veulent les expliquer à partir des processus en cours se produisant à l'intérieur de l'organisme. Ils cherchent à comprendre les mécanismes opérant à l'intérieur de l'organisme qui expliquent pourquoi les comportements

spécifiques résultent de circonstances environnementales particulières. (Bechtel, 2005, p. 113, traduction libre)¹⁵

Selon Bechtel (2005), un mécanisme est composé d'au moins deux éléments organisés dans le but de produire « quelque chose ». Il précise qu'un mécanisme ne comprend pas seulement des éléments (ou composantes), mais aussi des interactions (c'est-à-dire des opérations):

Selon mon analyse, un mécanisme est un système organisé de composantes et d'opérations. Les composantes du mécanisme et leur organisation produisent son comportement. (Bechtel, 2005, p. 113, traduction libre)¹⁶

Pour Craver et Darden (2001), la notion de mécanisme se définit de la même façon, quoique la terminologie diffère (les composantes deviennent des entités et les opérations, des activités) :

Les mécanismes sont des ensembles d'entités et d'activités organisés dans le but de produire des changements réguliers, de la condition initiale à la condition finale [...]. Les entités en neurobiologie incluent les choses comme les cellules pyramidales, les neurotransmetteurs, les régions cérébrales [...]. (Craver et Darden, 2001, p. 113, traduction libre)¹⁷

2.1.2.2 Éléments et interactions constituant les mécanismes cérébraux

Les éléments composant les mécanismes cérébraux sont constitués de différentes régions du cerveau travaillant ensemble pour accomplir une tâche. Ces

¹⁵ « Some investigators, however, are not interested in just discovering those laws but in explaining them in terms of ongoing processes occurring inside the organism. That is, they seek to understand the mechanisms operative within the organism that explain why, given particular environmental circumstances, specific behavior result. »

¹⁶ « On my analysis, a mechanism is an organized system of component parts and component operations. The mechanism's components and their organization produce its behavior, thereby instantiating a phenomenon »

¹⁷ « Mechanisms are collections of entities and activities organized in the production of regular changes from start or setup conditions to finish or termination conditions [...]. Entities in neurobiology include such things as pyramidal cells, neurotransmitters, brain regions, and mice. Activities are the various doings in which these entities engage. »

régions sont en fait des groupes de neurones accomplissant souvent des fonctions cognitives relativement précises. Par exemple, les mécanismes cérébraux associés à la lecture sont formés de différentes régions cérébrales interagissant les unes avec les autres. Le cortex visuel perçoit les lettres et envoie les informations au cortex occipito-temporal gauche qui procède à la reconnaissance des mots (Dehaene, Le Clec'H, Poline, Le Bihan et Cohen, 2002), ce qui active différentes régions du cortex temporal gauche qui décodent le sens des mots (Marinkovic, Dhond, Dale, Glessner, Carr et Halgren, 2003). Les régions cérébrales peuvent interagir de deux façons. L'excitation est un premier type d'interaction par lequel une région cérébrale (formée de plusieurs neurones) contribue à l'activation d'une autre région cérébrale. À l'inverse, l'inhibition, qui est le deuxième type d'interaction, se produit lorsqu'une région cérébrale contribue à la désactivation d'une autre région cérébrale ou d'un groupe de neurones.

Cette thèse ne vise pas à identifier les neurones ou les molécules chimiques impliqués dans les processus de changement conceptuel, mais elle vise plutôt à identifier les mécanismes cérébraux du changement conceptuel, c'est-à-dire à identifier les régions cérébrales liées au changement conceptuel en sciences (les éléments du mécanisme), ainsi que le type d'interactions qu'entretiennent les régions cérébrales les unes avec les autres (les interactions du mécanisme).

2.1.3 Liens entre les concepts de mécanisme cérébral et de changement conceptuel

Après avoir défini les concepts de changement conceptuel et de mécanisme aux sections précédentes, les relations entre ces deux concepts sont maintenant présentées. Il apparaît essentiel d'établir formellement les liens entre ces deux concepts puisqu'ils proviennent de perspectives de recherche différentes. La figure 2.1 présente un réseau conceptuel reliant les concepts de changement

conceptuel et de mécanisme cérébral (entourés par une ellipse) aux autres concepts pertinents ou aux dimensions importantes de chacun de ces deux concepts (encadrés par un rectangle). La nature des relations entre tous ces concepts est précisée par un texte sur chacune des flèches reliant deux concepts.

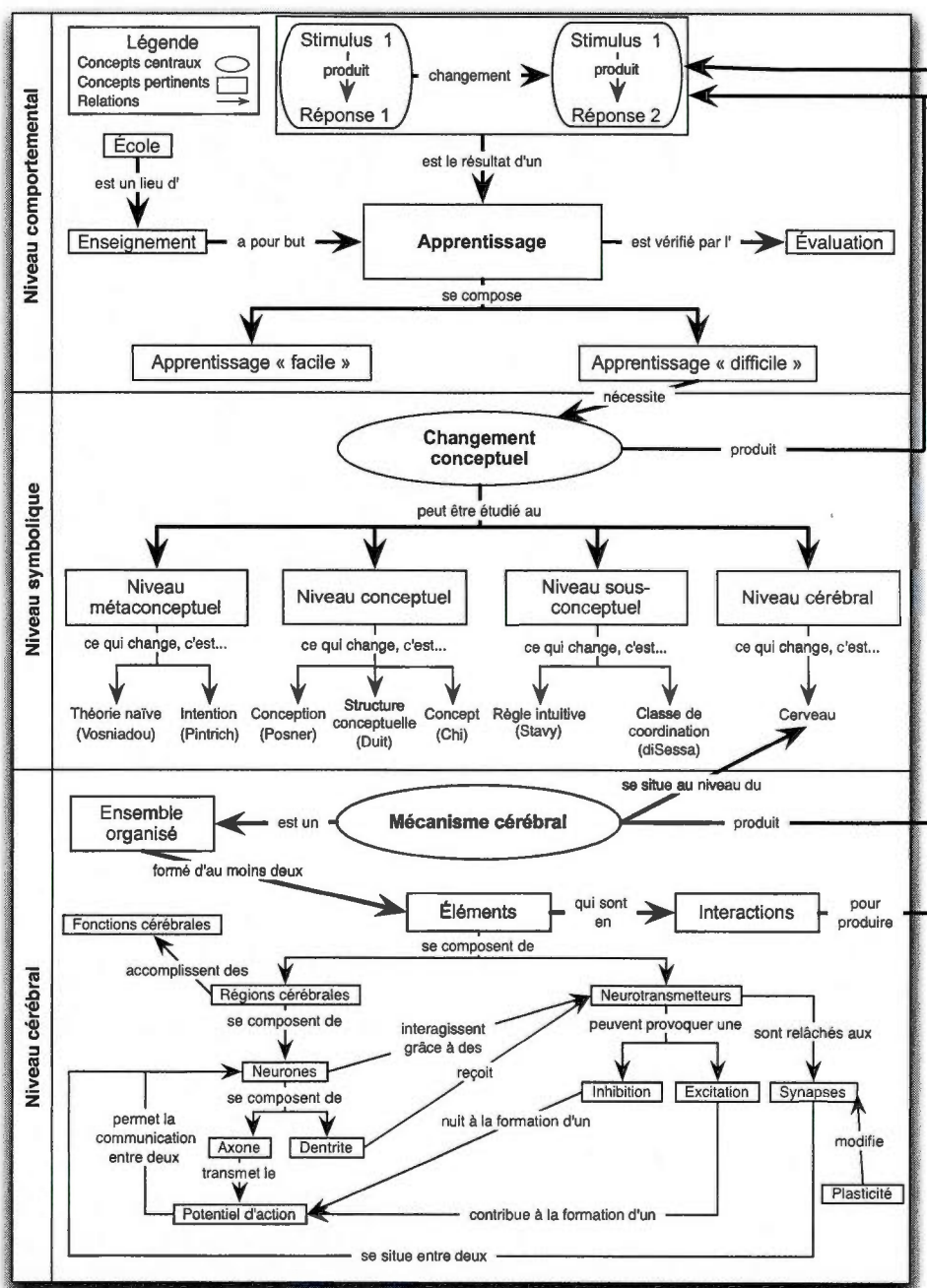


Figure 2.1 Réseau liant les concepts de changement conceptuel et de mécanisme cérébral.

Comme le montre la figure 2.1 (voir les titres à gauche de chacune des trois sections de la figure), les deux concepts analysés ne se situent pas au même niveau. Alors que le changement conceptuel se situe à un niveau qualifié de symbolique (parce qu'il implique une analyse effectuée à partir du langage, c'est-à-dire de symboles), un mécanisme cérébral se situe, comme son nom l'indique, au niveau cérébral. Un troisième niveau est présent dans le schéma, le niveau comportemental, dont la présence est nécessaire à la fois pour définir les termes de changement conceptuel et de mécanisme cérébral, mais aussi pour expliquer la relation entre ces deux concepts.

Les relations présentées à la figure 2.1 permettent de préciser ce qu'est un mécanisme cérébral lié au changement conceptuel. Un changement conceptuel désigne un changement nécessaire pour réussir un type d'apprentissage difficile à réaliser à cause de la persistance des conceptions inappropriées (diSessa, 2006). Au niveau comportemental, un apprentissage peut engendrer à la fois l'établissement d'une relation stimulus-réponse, mais aussi un changement de réponse par rapport à stimulus donné (voir en haut de la figure 2.1). Lorsqu'un changement de réponse est difficile à produire, davantage qu'un simple établissement par renforcement d'une relation entre un stimulus et une réponse peut s'avérer nécessaire : un changement conceptuel peut être requis. Ainsi, un mécanisme cérébral lié au changement conceptuel n'est ni un mécanisme qui explique de quelle façon un stimulus engendre une réponse, ni un mécanisme qui explique de quelle façon se produisent les changements de réponse faciles à réaliser. En fait, un mécanisme cérébral sous-tendant les processus de changement conceptuel est un mécanisme qui explique ce qui se passe au niveau cérébral lorsqu'un apprenant réalise un changement conceptuel.

2.2 Mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en sciences

Après avoir défini les termes de mécanisme cérébral et de changement conceptuel et établi les liens entre ces deux concepts, la deuxième partie de ce cadre théorique s'attarde aux principales recherches ayant directement ou indirectement abordé la question de recherche établie dans la problématique (« quels sont les mécanismes cérébraux qui sous-tendent le changement conceptuel en sciences? »). Le but de cette revue de la littérature est de préciser les objectifs de la présente recherche, tout en identifiant les régions cérébrales qui semblent jouer un rôle dans les processus de changement conceptuel. L'identification de ces régions et une définition plus précise des objectifs de recherche mènent à la formulation d'hypothèses opérationnelles à la fin de ce chapitre.

Les recherches comportant des données de neuroimagerie portant explicitement sur le changement conceptuel sont peu nombreuses. Pour cette raison, il est nécessaire que cette revue de la littérature de recherche ne se limite pas seulement aux recherches liées directement à la question de recherche. En plus des recherches portant sur le changement conceptuel en mécanique et en chimie, cette section présentera également les résultats de recherches portant sur le conflit cognitif et les erreurs de raisonnement logique dont les liens avec le changement conceptuel sont indirects, mais assez importants pour contribuer à la formulation des hypothèses de recherche.

2.2.1 Mécanismes cérébraux liés au conflit cognitif

Le champ d'études du changement conceptuel vise entre autres à comprendre de quelles façons les conceptions antérieures interagissent avec les concepts à enseigner. Fugelsang et Dunbar (2005) ont étudié à l'aide de l'IRMf ce qui arrive au niveau cérébral lorsqu'on présente des informations qui sont en opposition ou en

accord avec les conceptions des individus concernant l'efficacité d'un médicament pour lutter contre la dépression. Les conclusions de cette étude sont présentées à la figure 2.2. Six hommes et huit femmes droitiers âgés de 18 à 31 ans ont participé à cette étude. Les stimuli utilisés dans la tâche étaient des images montrant une pilule à côté d'un visage souriant ou déprimé. Dans les blocs d'informations présentés aux participants, il y avait plus ou moins de figures souriantes, ce qui permettait de présenter des données globalement en accord ou en désaccord avec les conceptions des participants.

Les résultats de cette recherche (voir figure 2.2) montrent que, lorsque les données qui sont présentées sont en accord avec leur conception, les participants activent davantage leur hippocampe, une partie du cerveau associée à l'apprentissage et à la mémoire (Poldrack *et al.*, 2002). Lorsque les données sont en désaccord avec leur conception (c'est-à-dire lorsqu'on cherche à provoquer un conflit cognitif chez le participant), ce sont plutôt le cortex cingulaire antérieur (ci-après CCA, associée à la détection d'erreur et à la gestion de conflits selon Botvinick, Cohen et Carter, 2004), le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (pouvant jouer un rôle dans certains processus d'inhibition selon Goel et Dolan, 2003) ainsi que le précunéus (détenant probablement un rôle prédominant dans la réorientation des ressources liées à l'attention selon Mazoyer, Wicker et Fonlupt, 2002) qui sont davantage activés.

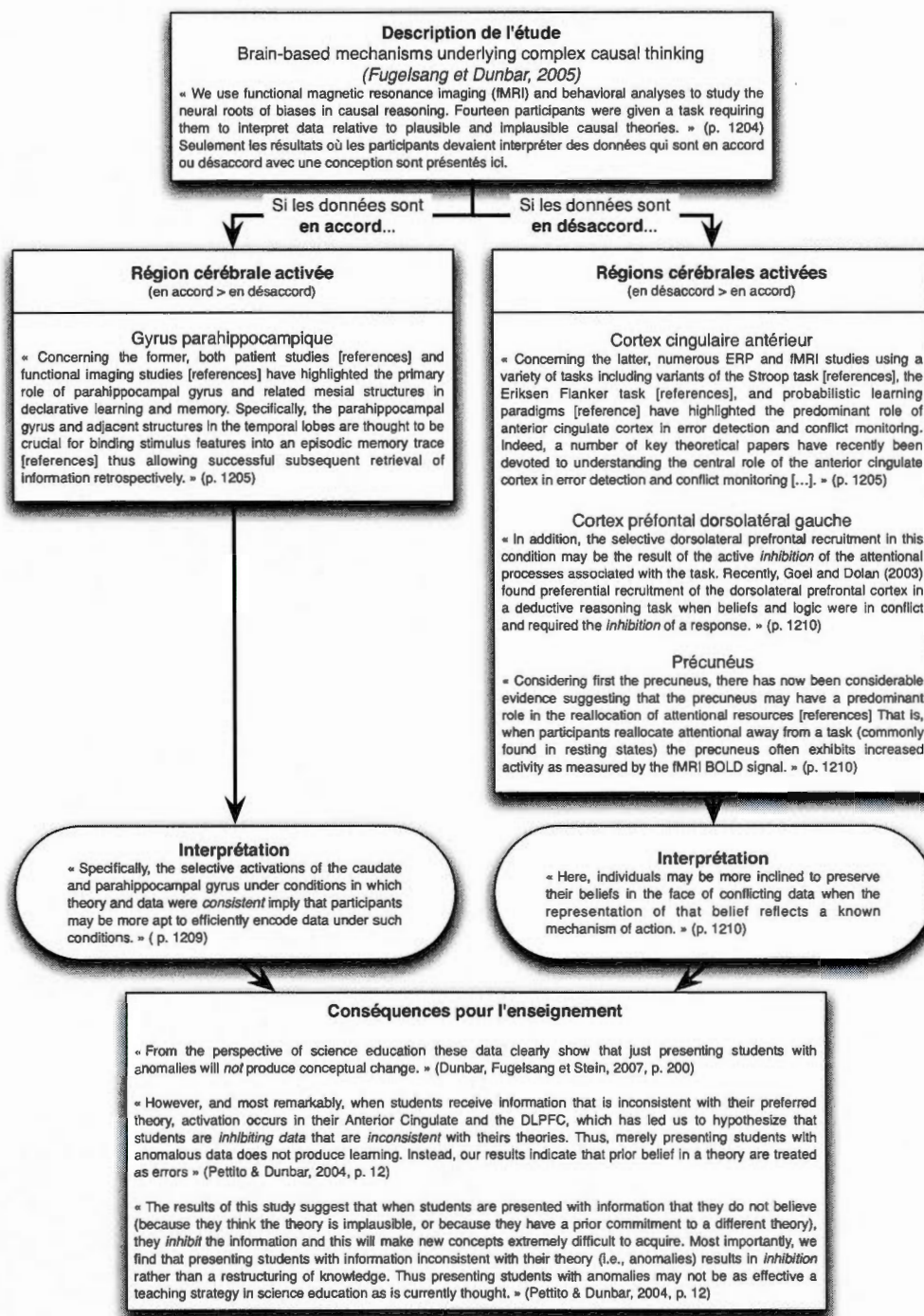


Figure 2.2 Étude de Fugelsang et Dunbar (2005) portant sur le rôle des conceptions antérieures dans le traitement de l'information.

Ainsi, ces données semblent indiquer que lorsqu'on présente aux participants des stimuli qui s'accordent avec leurs conceptions, le cerveau est plus apte à encoder les informations reçues. Par contre - et c'est le résultat le plus intéressant pour l'enseignement des sciences - lorsque les données sont en conflit avec les conceptions des élèves, le cerveau est plutôt porté à traiter les informations reçues comme étant des erreurs. Par conséquent, la présentation de ces données ne peut probablement pas mener, à elle seule, à une remise en question des conceptions des participants :

Nous avons découvert que présenter aux étudiants des informations en désaccord avec leur théorie (c'est-à-dire des anomalies) engendre une inhibition plutôt qu'une reconstruction de la connaissance. Donc, la présentation d'anomalies pourrait ne pas être une stratégie aussi efficace pour enseigner les sciences que ce qu'on croit actuellement. (Pettito et Dunbar, 2004, p. 12, traduction libre)¹⁸

L'une des régions significativement activées dans cette recherche de Fugelsang et Dunbar (2005) est le CCA. Puisque cette région est également mentionnée les recherches discutées dans les prochaines lignes, il convient de s'y attarder plus en détails. Il existe au moins deux grandes perspectives expliquant le rôle de cette région cérébrale dans la cognition et l'apprentissage. La première perspective insiste sur le fait que le CCA est souvent impliqué dans des tâches où la détection de conflits dans le traitement de l'information est nécessaire. Ces tâches incluent la tâche de Stroop (par exemple, Bench *et al.*, 1993; Bush *et al.*, 1998), les différentes versions de la tâche Flanker (par exemple Botvinick, Nystrom, Fissell, Carter et Cohen, 1999), les tâches liées au paradigme go/no-go (par exemple, Braver, Barch, Gray, Molfese et Snyder, 2001), et des tâches où les réponses spontanées doivent être surmontées (par exemple, Nathaniel-James, Fletcher et Frith, 1997).

¹⁸ « [...] we find that presenting students with information inconsistent with their theory (i.e., anomalies) results in *inhibition* rather than a restructuring of knowledge. Thus presenting students with anomalies may not be as effective a teaching strategy in science education as is currently thought »

Une seconde perspective associe le CCA à l'évaluation des conséquences futures de nos actions et décisions actuelles. Cette perspective s'appuie sur un ensemble d'études montrant que le CCA est activé lorsque des conséquences négatives sont attendues comme, par exemple, les pertes monétaires dans les jeux de hasard (Bush et al., 2002), les rétroactions négatives (par exemple van Duijvenvoorde, Zanolie, Rombouts, Raijmakers et Crone, 2008) et le rejet social (Eisenberger, Lieberman et Williams, 2003). Dans cette perspective, il est soutenu que le CCA guide la prise de décision en effectuant une analyse coûts/bénéfices, peut-être à partir des conséquences ayant découlé des expériences passées.

Ces deux perspectives ne sont pas nécessaires en compétition. Par exemple, Botvinick et son équipe (Botvinick, 2007; Botvinick, Braver, Barch, Cohen et Carter, 2001; Botvinick, Cohen, et Carter, 2004) propose une théorie intégrative du rôle du CCA dans laquelle il affirme que la détection de conflits contribuerait à la prise de décision de deux façons : (1) en envoyant un signal annonçant la nécessité d'un meilleur contrôle cognitif dans le cortex préfrontal (ce qui est compatible avec la première perspective), mais aussi (2) en agissant comme un renforcement négatif menant à éviter les tâches ou les stratégies qui ont provoqué ce type de renforcement dans le passé (ce qui est compatible avec la seconde). Ainsi, selon ces chercheurs, la fonction centrale du CCA est de détecter les conflits, c'est-à-dire de détecter l'activation de représentations incompatibles qui sont en compétition. (Botvinick, Cohen et Carter, 2004).

2.2.2 Mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage du raisonnement logique

L'une des recherches illustrant bien le rôle du CCA dans le contrôle cognitif et présentant le plus de parenté avec le changement conceptuel est la recherche utilisant la tomographie par émission de positrons (TEP) de Houdé *et al.* (2000)

portant sur une erreur courante de raisonnement logique. Dans leur étude, les auteurs ont comparé l'activité cérébrale de huit étudiants masculins âgés de 19 à 26 ans avant (taux de réussite de moins de 10 %) et après avoir suivi un entraînement (taux de réussite de plus de 90 %).

Avant l'entraînement, les régions occipitales liées à une stratégie perceptuelle sont plus activées qu'après l'entraînement et, inversement, après l'entraînement, ce sont plutôt les régions frontales qui sont davantage activées incluant des régions du cortex préfrontal gauche (voir figure 2.3). Notons que le CCA fait partie des régions qui sont davantage activées après l'entraînement qu'avant. Selon l'interprétation d'Houdé et de ses collaborateurs, ce passage d'une activité cérébrale postérieure à une activité plus antérieure montre que les participants à l'étude doivent inhiber la stratégie perceptuelle spontanément utilisée à l'aide notamment du CCA et de régions préfrontales, pour arriver à raisonner de manière logique et répondre correctement à la question posée.

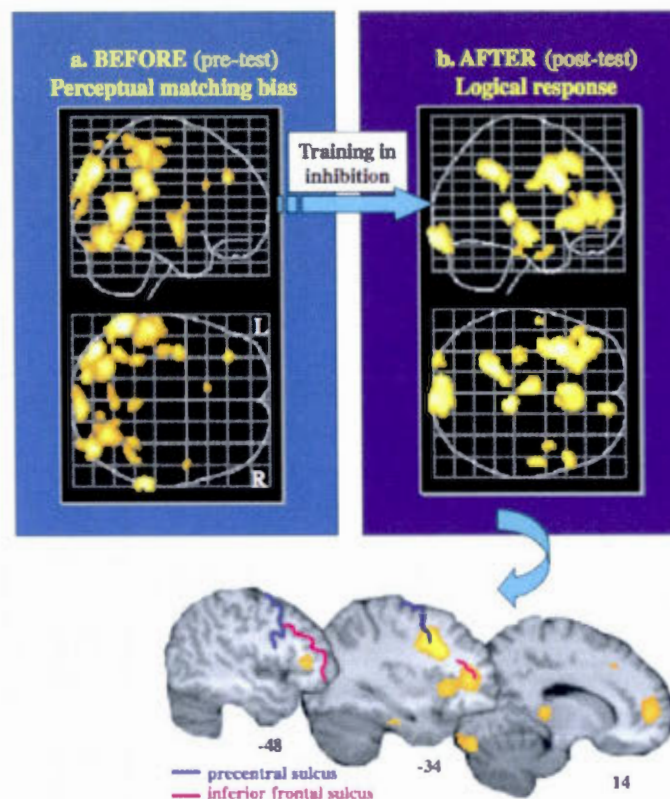


Figure 2.3 Étude portant sur une erreur courante de raisonnement logique. (Tiré de Houdé *et al.* 2000)

Dans une autre étude, Houdé *et al.* (2001) ont comparé l'activité cérébrale de deux groupes n'ayant pas suivi le même enseignement. Le but de cette recherche était d'identifier les régions cérébrales rendant possible la formulation de réponses logiques. Dans un des groupes formés de quatre étudiants masculins âgés de 19 à 26 ans, un enseignement logique a été réalisé, alors que dans l'autre, formé de huit étudiants masculins âgés de 19 à 26 ans, on a réalisé un enseignement qualifié de logicoémotionnel¹⁹. Au pré-test, les participants des deux groupes répondaient

¹⁹ L'enseignement logicoémotionnel inclut des alertes présentées en italique : « *Dans ce problème, la source d'erreur vient de l'habitude que l'on a tous de se concentrer sur les cartes dont la lettre ou le chiffre est cité(e) dans la règle et de ne pas prêter attention aux autres cartes.* [...] Donc, le but est ici

incorrectement à plus de 90 % des questions. Au post-test, les participants du groupe ayant reçu un enseignement logique continuaient à répondre incorrectement à plus de 90 % des questions. Par contre, ceux ayant reçu un enseignement logicoémotionnel (ou enseignement par inhibition) répondaient correctement à plus de 90 % des questions du post-test.

Les résultats montrent notamment que le cortex préfrontal ventromédial lié au contrôle des émotions et à la prise de décision (Damasio, 1994) et le CCA lié à la détection de conflits (Botvinik, 2007) sont plus activés dans le groupe ayant réussi le changement de stratégies (enseignement logicoémotionnel) que dans l'autre (enseignement logique), où les membres continuent, même après l'enseignement, à faire la même erreur de logique. Ces activations situées dans le cortex préfrontal et le CCA se retrouvent dans la plupart des recherches où l'on demande aux participants de surmonter des réponses spontanées inappropriées (Bush *et al.*, 1998; Menon, Adelman, White, Glover et Reiss, 2001; Nathaniel-James, Fletcher et Frith, 1997; Stavy et Babai, 2010).

Le changement conceptuel et l'apprentissage réalisé par les participants ayant réussi à raisonner logiquement après un enseignement logicoémotionnel comportent certains points en commun. Premièrement, dans les deux cas, les sujets font systématiquement des erreurs aux questions posées et, deuxièmement, dans les deux cas, il semble difficile d'apprendre aux sujets à répondre adéquatement aux questions posées. Par conséquent, il semble plausible que les mécanismes cérébraux de changement conceptuel aient une certaine parenté avec ceux liés à l'apprentissage du raisonnement logique.

1 / de ne pas tomber dans le piège des deux cartes A et 3 citées dans la règle et 2 / de considérer toutes les cartes, A, D, 3 et 7, une par une en imaginant... » (Houdé *et al.*, 2001, p. 570).

2.2.3 Mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en mécanique

Dans une étude pilote portant cette fois plus directement sur le changement conceptuel, Dunbar et ses collaborateurs (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Pettito et Dunbar, 2004) ont tenté quant à eux d'explorer les mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en mécanique. Pour ce faire, ils ont comparé l'activité cérébrale de deux groupes à l'aide de l'IRMf. Un premier groupe est formé d'étudiants universitaires qui n'ont suivi aucun cours de physique. Un second est formé d'étudiants universitaires ayant suivi au moins cinq cours de physique. Les étudiants des deux groupes possédaient des moyennes universitaires comparables et la proportion d'hommes et de femmes est identique dans les deux groupes. Un test, le *Force Concept Inventory* (Hestenes, Wells & Swackhame, 1992), a confirmé que les experts possédaient une connaissance approfondie de la mécanique. La tâche cognitive demandée aux participants consistait à appuyer sur un bouton pour dire si le film montrant deux balles qui tombent est conforme à ce qui arriverait dans un environnement sans frottement. On a présenté aux participants des films naïfs (c'est-à-dire conformes aux conceptions des novices : la balle la plus lourde tombe plus vite) et des films scientifiques (c'est-à-dire conformes aux conceptions des experts : la balle la plus lourde tombe à la même vitesse que la plus légère). Les détails de la méthodologie utilisée (nombre de sujets, nombre de stimuli, chronométrage, paramètres liés à l'acquisition des données, type d'analyse, etc.) n'ont pas été publiés.

Les principaux résultats obtenus sont présentés à la figure 2.4. Premièrement, on remarque que le cortex frontal médial - une région qui serait associée à la présence de conceptions préexistantes selon l'interprétation que font Pettito et Dunbar (2004) du travail de Benfield *et al.* (2000) - est activé lorsqu'on présente des films en accord avec les conceptions des participants (films naïfs pour les non scientifiques et films scientifiques pour les scientifiques), mais que les scientifiques activent également leur cortex frontal médial lors de la présentation de films naïfs qui ne sont

donc pas en accord avec leurs conceptions. De plus, cette activation du cortex frontal médial est combinée avec une activation du CCA. Selon Pettito et Dunbar (2004), cette double activation pourrait signifier que les scientifiques possèdent encore des conceptions inappropriées (activation du cortex frontal médial), mais que, contrairement aux non scientifiques, ils arrivent à inhiber ces conceptions grâce à l'intervention du CCA. Ces résultats laissent donc entendre que les participants scientifiques doivent inhiber plutôt que de modifier ou restructurer de façon importante leurs conceptions antérieures afin de réussir un changement conceptuel, ce qui modifie considérablement notre vision du changement conceptuel :

Plusieurs théoriciens en éducation voient cette réorganisation conceptuelle comme étant le but ultime de l'éducation et voient le changement conceptuel comme étant si complet que les étudiants ne seraient même plus capables de conceptualiser leurs anciennes théories suite au changement conceptuel (le concept d'incommensurabilité de Kuhn). Les résultats de l'étude rapportée dans ce chapitre indiquent que, même lorsque le changement conceptuel semble avoir eu lieu, les étudiants ont toujours accès à leurs anciennes théories naïves et que ces théories semblent être activement inhibées plutôt que réorganisées ou absorbées dans une nouvelle théorie. (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007, p. 202, traduction libre)²⁰

²⁰ « Many educational theorists see this conceptual reorganization as being *the* key goal of education and see conceptual change as so complete that students will not event be able to conceptualize their old theories following a conceptual change (Kuhn's notion of incommensurability). Yet the results of the experiments reported in this chapter indicate that even when conceptual change appears to have taken place, students still have access to the old naïve theories and that these theories appear to be actively inhibited rather that reorganized and absorbed into the new theory. »

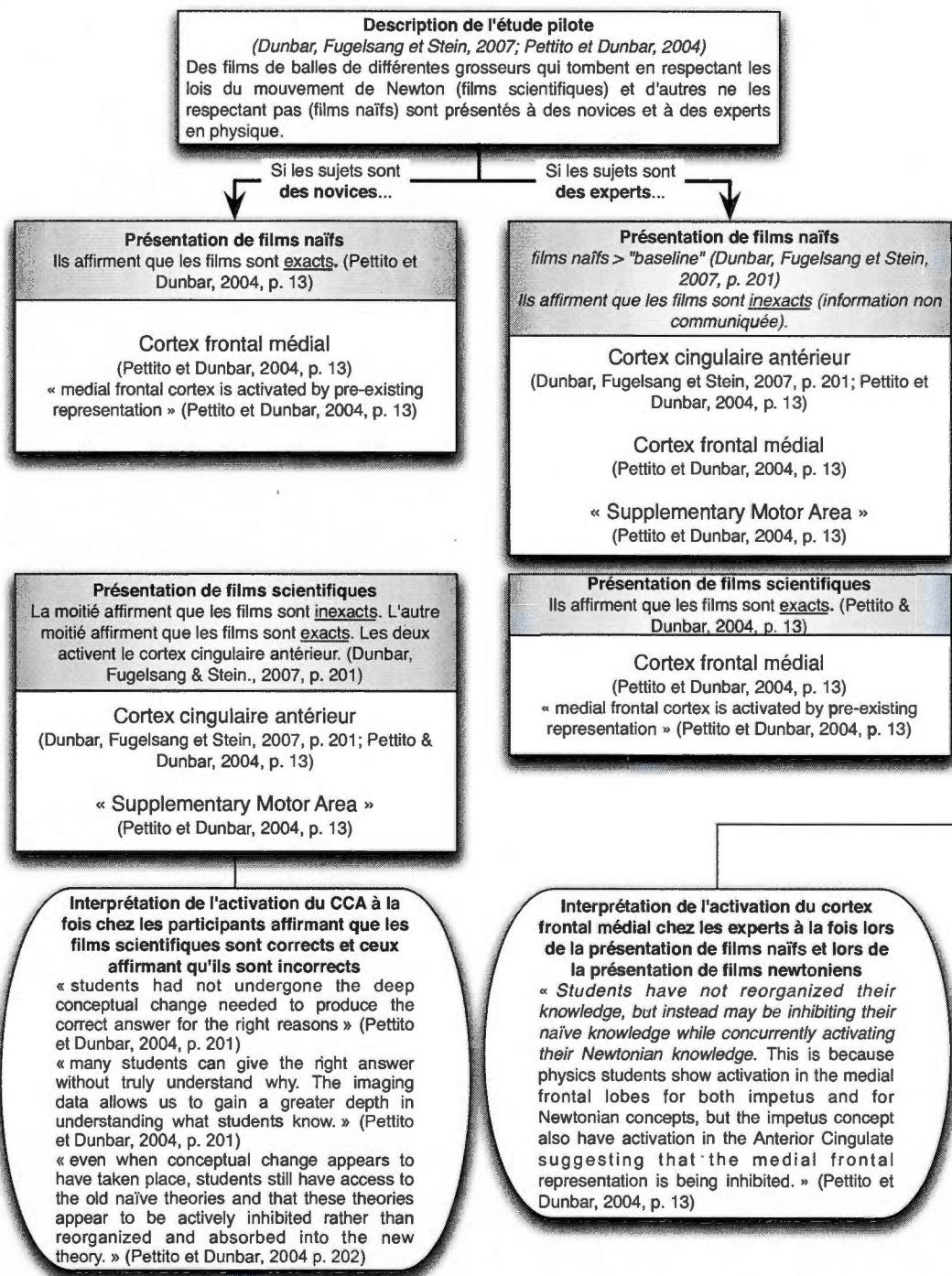


Figure 2.4 Étude portant sur l'expertise scientifique en mécanique (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Pettito et Dunbar, 2004).

Deuxièmement, alors que l'on s'attend à ce que le CCA soit activé seulement dans les situations où les participants affirment être en désaccord avec les films présentés, on remarque que cette région est activée dans une autre situation : lorsque les participants non scientifiques répondent correctement en affirmant que les films scientifiques sont conformes à leurs attentes. Dunbar, Fugelsang et Stein (2007) sont d'avis que les étudiants n'ayant pas eu de cours de physique, mais qui répondent correctement, n'ont pas réussi un « profond » changement conceptuel, puisqu'ils ne comprennent pas pourquoi leur réponse est adéquate.

Cette recherche de Dunbar, Fugelsang et Stein (2007) portant sur le changement conceptuel en physique arrive à la même conclusion que la recherche de Houdé *et al.* (2001) : pour arriver à répondre correctement à certaines questions difficiles, le cerveau a recours à des mécanismes cérébraux d'inhibition impliquant des régions du cortex frontal et le CCA.

2.2.4 Mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en chimie

Dans une autre recherche pilote portant cette fois sur les mécanismes cérébraux liés à l'expertise en chimie (plus précisément, concernant les changements de phase de la matière), Nelson, Lizcano, Atkins et Dunbar (2007) ont demandé à 9 novices (n'ayant suivi aucun cours autre que la chimie générale et n'ayant pas suivi de cours de chimie depuis au moins deux ans) et 10 experts (ayant suivi au moins quatre cours de chimie) d'indiquer si une image montrant des molécules représente bien ce qui arrive aux molécules d'un liquide chauffé jusqu'à évaporation. Les détails méthodologiques de cette étude n'ont pas été publiés.

Ils ont observé, comme le montre la figure 2.5, que les experts activent davantage le cortex frontal inférieur gauche associé à la mémoire de travail et à la

récupération d'informations stockées dans la mémoire à long terme, alors que les novices activent davantage des régions du lobe temporal inférieur et du lobe occipital. Selon les auteurs de l'étude, cela signifie que les « non-experts utilisent plus fortement dans cette tâche les mécanismes de l'attention visuelle et de la perception, alors que les experts utilisent davantage des régions frontales associées à la mémoire de travail et à la récupération sémantique. »²¹ Ces résultats comportent des ressemblances avec ceux obtenus par Houdé *et al.* (2000) concernant le raisonnement logique. On observe en effet le passage d'une stratégie perceptuelle à une stratégie mobilisant des aires préfrontales.

²¹ « non-experts rely more heavily on perceptual and visual attention mechanisms on this task, while experts rely more heavily on frontal areas associated with working memory and semantic retrieval. »

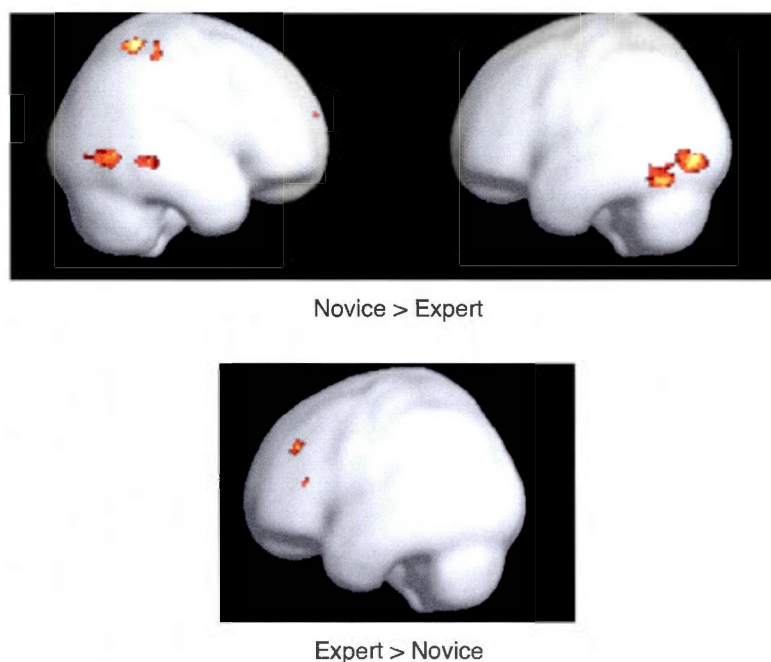


Figure 2.5 Étude portant sur l'expertise scientifique en chimie. (Tiré de Nelson, Lizcano et Dunbar, 2007)

Si l'étude précédente portant sur la mécanique est intéressante parce qu'elle ouvre la voie à une nouvelle façon de concevoir les processus de changement conceptuel, cette recherche portant sur la chimie permet d'entrevoir un mécanisme possible par lequel les processus de changement conceptuel pourraient se dérouler. En effet, à partir de ces résultats, il devient plausible de penser que les novices et les experts en sciences n'utilisent pas les mêmes stratégies pour résoudre un problème. Alors que les novices semblent recourir spontanément à une stratégie perceptuelle basée sur une activité cérébrale postérieure et menant à la formulation de réponses erronées, les experts semblent pour leur part avoir recours à une stratégie plus efficace nécessitant l'intervention du cortex préfrontal. Comme les résultats de cette recherche comportent des similitudes importantes avec ceux de la recherche de Houdé *et al.* (2000) - déplacement de l'activité cérébrale de la partie postérieure du

cerveau à la partie antérieure - on peut se demander si l'inhibition d'une stratégie perceptuelle inappropriée ne jouerait pas un rôle dans les processus de changement conceptuel en chimie.

2.3 Hypothèse de recherche

Dans cette section, une opérationnalisation de l'hypothèse selon laquelle l'inhibition joue un rôle dans le changement conceptuel est présentée.

2.3.1 Possible rôle de l'inhibition dans le changement conceptuel

D'une étude à l'autre, on remarque des points communs qui servent d'ancrage à nos hypothèses de recherche. Premièrement, à la fois dans la recherche de Fugelsang et Dunbar (2005) et dans celle de Dunbar, Fugelsang et Stein (2007), le CCA, une région associée à la détection de conflit selon Botvinick (2007), est davantage activé lorsqu'on présente des informations qui entrent en conflit avec les conceptions antérieures des participants. Deuxièmement, à la fois dans la recherche de Houdé *et al.* (2000) et dans celle de Nelson *et al.* (2007), on observe que les novices d'un domaine utilisent davantage des régions cérébrales associées à des stratégies perceptuelles, alors que les experts activent davantage des fonctions cognitives de haut niveau situées au niveau du lobe frontal. La théorie de Botvinick (2007) permet de lier ces deux résultats expérimentaux : l'activation du CCA détecte les conflits qui signalent la nécessité d'utiliser des fonctions cognitives de haut niveau situées dans le cortex préfrontal. Troisièmement, le concept d'inhibition est souvent utilisé pour interpréter les résultats obtenus : Dunbar, Fugelsang et Stein (2007) affirment que les experts ont besoin d'inhiber leurs conceptions inappropriées, alors que Houdé *et al.* (2000) affirment que, pour raisonner logiquement, il est parfois nécessaire d'inhiber des stratégies perceptuelles spontanées qui mènent à raisonner de façon illogique. Ces points communs que l'on retrouve dans l'ensemble des

recherches s'intéressant directement ou indirectement au changement conceptuel mènent à l'idée selon laquelle l'inhibition jouerait peut-être un rôle important dans les processus de changement conceptuel.

2.3.2 Régions cérébrales liées à l'inhibition

Pour rendre cette idée plus opérationnelle, il est nécessaire de connaître les régions cérébrales essentielles à l'inhibition de réponses spontanées inappropriées. Depuis la fin des années 1990, de nombreuses recherches neuroscientifiques ont eu recours à des tâches classiques d'inhibition développées et utilisées depuis nombre d'années en psychologie comme la tâche go/no-go, la tâche Hayling et la tâche Stroop (Stroop, 1935). Ces recherches ont permis d'identifier les mécanismes cérébraux liés à l'inhibition. Il existe de nombreuses variantes de ces tâches, mais, typiquement, il est demandé aux participants de répondre à une tâche qui comporte deux types de questions. Dans le premier type, on pose des questions relativement simples auxquelles le participant répond sans difficulté et, dans le second type, on pose une question semblable, mais qui implique de surmonter une habitude (c'est-à-dire d'inhiber une réponse spontanée), ce qui la rend plus difficile.

Par exemple, Nathaniel-James, Fletcher et Frith (1997) ont utilisé la tâche Hayling pour étudier l'inhibition. Dans cette tâche, il est demandé de trouver le dernier mot d'une phrase (par exemple, « The captain wanted to stay with the sinking _____ »). Lorsqu'on demande aux participants de trouver un mot qui n'a pas de sens par rapport au contexte de la phrase, ce qui implique d'inhiber le mot venant spontanément à l'esprit (par exemple, « Most cats see very well at BANANA »), le CCA et le cortex préfrontal ventrolatéral sont plus activés que lorsqu'ils doivent trouver un mot qui a du sens par rapport au reste de la phrase (« Most cats see very well at NIGHT »).

Bush *et al.* (1998) ont eu recours à une variante de la tâche Stroop, qu'ils ont appelé « Counting Stroop », pour étudier eux aussi l'inhibition. Ils ont demandé à des participants de dire le nombre de mots présentés à l'écran. Ces mots étaient tous identiques (par exemple, si on retrouve « bird, bird, bird, bird » à l'écran, le participant doit répondre quatre). Deux types de questions sont posés : des questions où les mots sont des noms d'animaux et des questions où les mots sont des chiffres. Lorsque le mot présenté est un chiffre, le participant doit inhiber sa tendance à dire le chiffre lu et plutôt dire le nombre de mots (par exemple, si l'écran comprend « deux, deux, deux, deux », le participant ne doit pas répondre « deux », mais bien « quatre », ce qui implique d'inhiber la tendance à dire deux). Les résultats obtenus montrent que de nombreuses régions sont plus activées lorsque les questions posées demandent de l'inhibition. Le CCA et le cortex préfrontal dorsolatéral sont parmi les régions les plus activées. Les autres régions significativement plus activées sont le gyrus précentral, le cortex prémoteur, le gyrus temporal inférieur et le lobule pariétal supérieur. Les auteurs de l'étude insistent sur l'activation du CCA, une région impliquée dans de nombreuses recherches sur l'inhibition (par exemple, Bench *et al.*, 1993).

Un autre exemple de recherche sur l'inhibition : celle de Menon, Adelman, White, Glover et Reiss (2001) avec la tâche « go/no-go ». Dans cette tâche, il est demandé aux participants d'appuyer sur un bouton à chaque fois qu'ils voient une lettre (condition « go »), mais d'inhiber leur réponse motrice (c'est-à-dire ne pas appuyer) lorsqu'ils voient la lettre X (condition « no-go »). Le CCA, le cortex préfrontal dorsolatéral gauche et droit et le cortex préfrontal ventrolatéral gauche et droit étaient significativement plus activés dans la condition « no-go » par rapport à la condition « go ». Le cortex prémoteur, le gyrus lingual, le lobe pariétal inférieur et le noyau caudé faisaient également partie des régions plus activées.

Le CCA est présent dans l'ensemble des études sur l'inhibition. Certaines régions du cortex frontal, dont le cortex préfrontal ventrolatéral et dorsolatéral, se retrouvent également parmi les régions activées lorsqu'il est question d'inhibition. La connaissance des régions cérébrales impliquées dans l'inhibition nous permet d'opérationnaliser cette idée selon laquelle l'inhibition joue un rôle dans le changement conceptuel en l'associant à l'activité de régions cérébrales précises (le CCA et le cortex préfrontal) qui peut être mesurée avec un appareil d'imagerie cérébrale.

2.3.3 Comparaison entre experts et novices pour étudier le changement conceptuel

Pour arriver à une hypothèse opérationnelle, il faut déterminer de quelle façon le changement conceptuel peut être étudié à partir de l'imagerie cérébrale. À la section 1.1.2, nous avons vu que les processus de changement conceptuel peuvent être difficiles et longs. Par conséquent, un devis de recherche proposant de comparer l'activité cérébrale avant et après un changement conceptuel est difficilement réalisable à l'intérieur d'un intervalle de temps raisonnable.

Plutôt que de comparer l'activité cérébrale avant et après la réalisation d'un changement conceptuel, une stratégie plus réaliste consiste à comparer l'activité cérébrale d'un groupe de scientifiques qui semble avoir réalisé un changement conceptuel avec un groupe de non scientifiques ne l'ayant pas réalisé. Cette stratégie consistant à comparer l'activité cérébrale des experts et des novices d'un domaine est courante en neuroéducation. Elle a fait ses preuves dans les domaines de la lecture (Beaulieu *et al.*, 2005; Turkeltaub, Gareau, Flowers, Zeffiro et Eden, 2003) et des mathématiques (Grabner, Ansari, Reishofer, Stern, Ebner et Neuper, 2007). Elle est également celle préconisée par les recherches en neurodidactique des sciences

menées par l'équipe de Dunbar en chimie (Nelson, Lizcano, Atkins et Dunbar, 2007) et en mécanique (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Pettito et Dunbar, 2004).

Cette stratégie comporte cependant un inconvénient. En effet, comme nous ne mesurons pas directement les différences d'activité cérébrale découlant de l'apprentissage des sciences (ce qui aurait exigé un pré-test et un post-test), l'établissement de liens entre les différences observées entre les experts et les novices et les mécanismes liés au changement conceptuel doit se faire avec prudence. Les résultats de la présente recherche nous informent sur les différences entre le fonctionnement du cerveau des novices (qui répondent incorrectement à la tâche parce qu'ils n'ont pas réalisé un changement conceptuel) et celui des experts, mais pas directement sur les processus de changement conceptuel.

Grâce à cette stratégie consistant à comparer experts et novices, l'objectif de la présente recherche se concrétise et consiste essentiellement à répondre à la question suivante : les experts en sciences activent-ils davantage leur CCA et leur cortex préfrontal que les novices lorsqu'ils doivent répondre correctement à des questions portant sur des concepts scientifiques dont l'acquisition nécessite un changement conceptuel?

La réponse à cette question pourrait avoir des répercussions sur le champ de recherche du changement conceptuel et sur l'enseignement des sciences. Si cette hypothèse se confirme et que les experts activent davantage le CCA et le cortex préfrontal, cela pourrait signifier que les experts doivent vraisemblablement inhiber leurs réseaux de neurones associés à des réponses spontanées pour arriver à formuler des réponses scientifiquement valables. Si, au contraire, les résultats ne montrent pas une plus grande activation des régions associées à l'inhibition, cela pourrait signifier soit que (1) l'inhibition ne joue aucun rôle dans le changement conceptuel ou que

(2) l'inhibition joue un rôle temporaire dans le changement conceptuel. Si la deuxième possibilité (« l'inhibition joue un rôle temporaire ») s'avérait fondée, cela pourrait vouloir dire que le changement conceptuel débute par une première phase où l'inhibition des conceptions antérieures est nécessaire et se poursuit par une seconde phase - l'automatisation - au terme de laquelle les apprenants n'auraient plus besoin d'inhiber leurs conceptions inappropriées et arriveraient à répondre spontanément de façon scientifique aux questions posées sans avoir recours au CCA et au cortex préfrontal.

2.3.4 Choix d'étudier l'expertise scientifique en électricité

Une dernière étape est nécessaire pour arriver à une hypothèse de recherche pleinement opérationnalisée : le choix du ou des concepts scientifiques dont l'acquisition nécessite un changement conceptuel.

Dans un article portant sur l'histoire du changement conceptuel, diSessa (2006) cite en exemples les concepts de matière et de densité, la mécanique newtonienne, l'électricité, la relativité, l'évolution et la génétique. Dans une revue de la littérature, Wandersee, Mintzes et Novak (1994) citent plusieurs exemples de recherches ayant démontré l'existence de conceptions persistantes dans plusieurs domaines. La physique est le domaine le plus couramment étudié selon ces auteurs. À l'intérieur de la physique, la mécanique s'avère le sous-domaine le plus étudié par les chercheurs (300 recherches sur les 700 recensées), l'électricité vient en deuxième avec 159 recherches sur 700, les concepts de matières et d'énergie en troisième (70 études sur 700), la Terre et l'espace en quatrième (35 sur 700) et, finalement, au cinquième rang, la physique moderne (relativité et mécanique quantique) avec seulement 10 recherches sur 700.

Les concepts scientifiques liés à la mécanique et à l'électricité sont donc parmi les plus étudiés dans les recherches portant sur le changement conceptuel. Par conséquent, il semble naturel de s'intéresser, en priorité, aux mécanismes cérébraux liés aux concepts difficiles en mécanique et en électricité. Notre recherche se concentre donc sur un domaine encore inexploré par la neurodidactique des sciences : l'électricité.

Plusieurs fausses conceptions sont associées au domaine de l'électricité, mais les plus étudiées sont celles associées à des circuits électriques simples incluant des ampoules, une source d'alimentation et des fils (Wandersee, Mintzes et Novak, 1994). Parmi les conceptions erronées les plus fréquentes, on retrouve les suivantes :

- Un seul fil est nécessaire pour allumer une ampoule (« single-wire model »);
- L'électricité sort des deux pôles de la pile pour atteindre les ampoules du circuit (« clashing-currents »);
- Le courant qui sort d'un côté de la pile est graduellement consommé par les ampoules du circuit, puis revient à l'autre borne de la pile (« unidirectional model, without conservation »).

Comme la recherche proposée souhaite comparer des novices qui sont au tout début d'un processus de changement conceptuel avec des experts ayant réussi ce même changement, il s'avère pertinent d'identifier la conception la plus répandue au début du processus de changement conceptuel en électricité.

Selon Wandersee, Mintzes et Novak (1994), plus de 50 % des jeunes enfants croient qu'un seul fil électrique est nécessaire pour allumer une ampoule avec une pile (« single-wire model »). Par la suite, c'est le modèle « clashing-currents » qui devient prédominant avec un taux d'adhésion de 35 à 40 %; ce modèle est progressivement remplacé par le modèle unidirectionnel. Le modèle scientifique

(« unidirectional model, with conservation ») n'est évident que pour 10 % des jeunes de 12 ans et 60 % des jeunes de 18 ans. La conception qui semble donc la plus « naïve » est donc la croyance selon laquelle un seul fil est nécessaire pour allumer une ampoule.

Des résultats similaires à ceux décrits dans le paragraphe précédent ont été obtenus dans une étude publiée en 2006 par Çepni et Keles. Ces chercheurs ont comparé les conceptions des étudiants à différents âges : 11, 13, 16, 19 et 22 ans. À 11 ans, le modèle « single-wire » est le plus populaire avec 58 %. À 13 ans, les élèves sont hésitants avec 24 % adhérant au « unidirectional model, without conservation » et 22 % adhérant plutôt au modèle « clashing-currents ». Ce n'est qu'à partir de 16 ans que certains élèves (22 %) possèdent une conception scientifique du concept de courant électrique. Ce nombre progresse à 58 % à 19 ans pour atteindre 72 % à 21 ans, mais plusieurs étudiants (50 % à 16 ans, 36 % à 19 ans et 20 % à 21 ans) continuent à croire au modèle « clashing-currents ». Cette recherche confirme le résultat rapporté par Wandersee, Mintzes et Novak (1994) selon lequel la conception « un seul fil est nécessaire pour allumer une ampoule » est très répandue au tout début des processus de changement conceptuel.

En se basant sur ces recherches portant sur les conceptions des élèves en électricité, la conception selon laquelle un seul fil est nécessaire pour allumer une ampoule apparaît donc être la plus répandue au début du changement conceptuel et donc celle qui s'avère la mieux adaptée aux objectifs de la présente recherche. Le choix de l'électricité et de cette conception fréquente mène à la formulation de l'hypothèse selon laquelle les experts en sciences activeraient davantage que les novices leur CCA et leur cortex préfrontal lorsqu'ils doivent répondre correctement à des questions portant sur des circuits électriques montrant des ampoules connectées à une pile par un seul fil.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

La première section de ce chapitre présente les critères de sélection des sujets, la seconde justifie le choix de l'IRMf et décrit les tâches demandées aux participants, la troisième décrit le protocole de collecte des données et, finalement, la quatrième explique la procédure d'analyse des données.

3.1 Sujets

3.1.1 Critères généraux de sélection

Pour détecter des différences statistiquement significatives, il faut non seulement un nombre suffisant de données pour chacun des sujets et un nombre suffisant de sujets par groupe, mais il faut aussi que la variabilité cérébrale entre les sujets d'un groupe ne soit pas trop élevée. Pour réduire cette variabilité causée notamment par le sexe (Grabner *et al.*, 2007), l'âge et le fait d'être gaucher ou droitier, les participants sélectionnés des deux groupes (experts et novices) sont des hommes droitiers, âgés de 19 à 30 ans. Dans le même ordre d'idée, pour contrôler les effets possibles du niveau d'éducation, les participants des deux groupes sont des étudiants d'un baccalauréat universitaire. De plus, les étudiants possédant une moyenne universitaire atypique, c'est-à-dire inférieure à 2,3 ou supérieure à 4,1 sur 4,3, ont été exclus de l'étude.

3.1.2 Critères de sélection des experts et des novices en sciences

Les participants novices sélectionnés sont des étudiants d'un baccalauréat non scientifique de l'Université de Montréal ou de l'Université du Québec à Montréal

(histoire, politique, communication, psychologie, philosophie, droit ou kinanthropologie) qui n'ont jamais suivi de cours optionnel en sciences pendant leur parcours scolaire. De plus, les réponses qu'ils ont fournies à un questionnaire (voir appendice A) montrent qu'ils adhèrent à la conception erronée selon laquelle un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule avec une pile et qu'ils croient (ce qui est scientifiquement correct) qu'une ampoule ne s'allume pas si le fil connectant l'ampoule à la pile est brisé. Lors de la séance d'IRMf, les participants devaient répondre, dans une proportion d'au moins 90 % de leurs réponses (1) qu'il est correct qu'une ampoule raccordée à une pile par un seul fil s'allume, (2) qu'il est incorrect qu'une ampoule raccordée à une pile par un seul fil ne s'allume pas et (3) qu'il est correct qu'une ampoule soit éteinte si le fil la liant à la pile est brisé.

Les participants experts sont des étudiants universitaires du baccalauréat en physique de l'Université de Montréal dont les réponses au questionnaire montrent qu'ils ne croient pas qu'un seul fil suffise pour allumer une ampoule, appuyant ainsi l'idée qu'ils ont réalisé un changement conceptuel au cours de leurs études en sciences. Comme pour les novices, les experts devaient également dire dans le questionnaire qu'une ampoule ne s'allume pas si le fil connectant l'ampoule à la pile est brisé, ce qui permet de vérifier que la question a bien été comprise par le participant. Lors de la séance d'IRMf, les participants devaient répondre correctement à au moins 90 % des questions posées, sinon ils étaient exclus.

3.1.3 Recrutement et le nombre de participants

Le recrutement s'est déroulé à l'Université du Québec à Montréal et à l'Université de Montréal. Sollicités pendant un de leurs cours, les étudiants ont été informés du but de la recherche, de ce que leur participation dans le projet de recherche impliquait, de leur droit de ne pas participer et des étapes à suivre s'ils voulaient participer. Ceux qui le souhaitaient ont laissé leurs coordonnées au

recruteur pour passer un questionnaire portant sur des questions liées aux sciences, vérifier si l'IRMf ne présente pas de contre-indications pour eux (voir la fin du formulaire de consentement de l'appendice B) et compléter le formulaire de consentement. Le questionnaire est formé de questions similaires à celles utilisées dans la tâche décrite à la section 3.2.2 (voir appendice A). Une image du cerveau du participant lui a été offerte pour le remercier de son implication dans l'étude.

Pour le recrutement des participants novices en sciences, plus de 500 étudiants provenant de 31 classes de différents baccalauréats en sciences humaines ont été rencontrés. Au cours de ces visites, 60 étudiants répondant aux critères de sélection ont laissé leurs coordonnées pour répondre aux questionnaires vérifiant leur éligibilité. De ce nombre, 48 étudiants se sont présentés au rendez-vous et ont répondu au questionnaire. Des 20 étudiants répondant aux critères de sélection (affirmer qu'un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule et qu'une ampoule ne peut s'allumer si le fil est brisé), 15 ont reçu un examen d'IRMf. Trois participants n'ont pas répondu comme il était prévu aux questions durant la séance d'IRMf (cf. section 3.1.2 portant sur les critères de sélection) et n'ont par conséquent pas été retenus. Les données des 12 participants restants ont été utilisées dans les analyses. Les questionnaires ont été passés individuellement pour éviter que les participants ne discutent entre eux des questions présentées dans le questionnaire.

Pour recruter les participants scientifiques, sept classes ont été visitées (baccalauréat en physique et en enseignement des sciences) touchant ainsi à près de 100 étudiants. De ce nombre, 20 scientifiques répondant à tous les critères de sélection se sont portés volontaires et ont laissé leurs coordonnées au recruteur. Puis, 16 étudiants provenant du baccalauréat en physique ont été contactés pour répondre au questionnaire. Parmi eux, 15 étudiants ont poursuivi leur implication et ont répondu au questionnaire, dont 13 ayant répondu correctement aux questions

concernant les circuits électriques (voir appendice A). Les images de l'activité cérébrale de 12 experts ont ensuite pu être recueillies. Un seul n'a pas répondu correctement lors de l'examen d'IRMf; donc, il a été possible de recueillir les images de l'activité cérébrale de 11 étudiants en physique.

Le tableau 3.1 résume l'ensemble des critères de sélection utilisés. Notons que la cote R^{22} des participants des deux groupes n'est pas équivalente (27,0 avec un écart-type de 3,4 pour les novices et 31,7 avec un écart-type de 2,3 pour les experts)²³. La cote R moyenne plus élevée des étudiants de physique s'explique peut-être par le fait que les étudiants sélectionnés sont principalement des étudiants de deuxième et troisième année et qu'un nombre assez important d'étudiants de première année abandonnent leur projet de compléter un baccalauréat en physique en raison de difficultés scolaires, ce qui a probablement pour effet d'augmenter la cote R moyenne des finissants en physique. Si nous avions accepté plusieurs étudiants de première année, cela aurait eu comme effet de diminuer le degré d'expertise de l'échantillon retenu, ce que nous n'avons pas jugé souhaitable. Une autre façon d'obtenir des cotes R équivalentes dans les deux groupes aurait été de sélectionner davantage de participants novices ayant une forte cote R . Malgré les efforts de recrutement déployés, il n'a pas été possible de recruter assez de participants novices ayant une cote R équivalente à celle des experts.

²² La cote R est une mesure du rendement académique obtenu à la fin des études collégiales. Cette cote est essentiellement constituée de la cote Z à laquelle on ajoute un facteur permettant de tenir compte de la force du groupe.

²³ Un étudiant du groupe des novices et un participant du groupe des experts n'ont pas pu fournir de cote R parce qu'ils avaient fait leurs études collégiales à l'extérieur du Québec.

Tableau 3.1 Profils des deux groupes de participants.

Novices	Experts
12 participants	11 participants
22,9 ans en moyenne (écart-type = 3,5)	22,1 ans en moyenne (écart-type = 2,3)
cote R moyenne de 27,0 (écart-type = 3,4)	cote R moyenne de 31,7 (écart-type = 2,3)
droitiers	droitiers
hommes	hommes
étudiants au baccalauréat	étudiants au baccalauréat
étudiants en sciences humaines	étudiants en physique
conceptions erronées (> 90 %)	conceptions scientifiques (> 90 %)

3.2 Instrumentation

3.2.1 Choix de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

Il existe plusieurs techniques d'imagerie cérébrale permettant de mesurer un signal corrélé avec l'activité cérébrale. Chacune des techniques comporte des avantages et des inconvénients. La tomographie par émission de positrons (TEP) permet de mesurer la variation locale de débit sanguin (ce qui peut être utile pour répondre à des questions de recherche en lien avec la réponse physiologique à l'activation cérébrale), mais cette technologie nécessite l'injection dans le sang de marqueurs radioactifs (Reivich *et al.*, 1979). Plus ancienne, la TEP n'offre pas non plus une résolution spatiale aussi bonne que l'IRMf. L'électroencéphalographie (EEG) (Berger, 1929) possède une excellente résolution temporelle et mesure directement l'activité électrique du cerveau, mais ne permet pas la localisation précise des activations. La magnétoencéphalographie (MEG) (Cohen, 1972) offre une excellente résolution spatiale et temporelle en plus de mesurer directement les champs magnétiques produits par les potentiels d'action des neurones. Par contre, elle ne permet pas de mesurer l'activité sous-corticale du CCA qui nous intéresse. L'imagerie optique, ou tomographie optique (Maki *et al.*, 1995), permet la

localisation et est moins sensible aux mouvements de tête que les autres techniques en plus d'être relativement silencieuse, mais la résolution spatiale est moins bonne et cette technologie, comme la MEG, ne permet pas d'atteindre le CCA. L'IRMf est choisie parce qu'il s'agit de la seule technique d'imagerie non invasive (c'est-à-dire qui ne requiert pas l'utilisation de marqueurs radioactifs comme pour la TEP) permettant d'étudier l'activation de régions profondes comme le CCA.

L'IRMf est une technologie récente, utilisée seulement depuis le début des années 1990 (Kwong *et al.*, 1992; Ogawa *et al.*, 1990, 1992). L'appareil est composé d'un aimant supraconducteur puissant (de 1,5 à 3,0 Teslas, et parfois même plus), de gradients magnétiques permettant la localisation spatiale et de générateurs d'ondes électromagnétiques qui agissent aussi comme des antennes captant le signal. Le principe de l'IRMf repose sur le fait que, lors de l'activation d'une région cérébrale, on observe une augmentation localisée de la concentration d'hémoglobine oxygénée. Comme l'hémoglobine oxygénée et l'hémoglobine désoxygénée ne possèdent pas les mêmes propriétés magnétiques, on observe une variation de signal lorsque la concentration change et qu'il y a une variation de l'activité cérébrale (Buckner, 1998).

L'appareil d'IRMf utilisé dans le cadre de cette recherche est le Siemens TRIO TIM de 3 teslas comprenant une antenne de 12 canaux. Cet appareil est situé à l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal (IUGM).

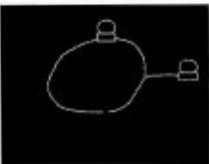
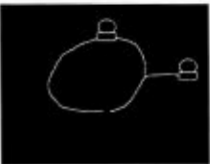
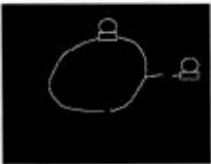
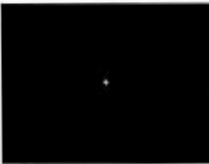
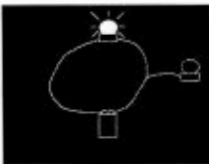
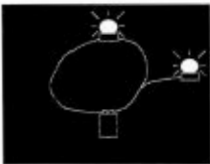
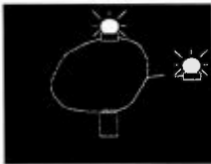
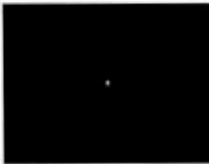




3.2.2 Tâche cognitive demandée aux participants

L'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique impose des contraintes qu'il faut respecter lors de la conception de la tâche cognitive demandée aux participants (Amaro et Barker, 2006; Huttel, Song et McCarthy, 2004; Mazoyer, 2001 et Ward, 2010). D'abord, puisque l'appareil émet un bruit important lors de

l'acquisition des images, il est difficile d'utiliser des stimuli auditifs et, en général, ce sont plutôt des stimuli visuels (présentés sur un miroir qui projette l'image d'un écran) qui sont utilisés. Ensuite, comme les participants doivent demeurer en position couchée et que leur tête doit demeurer complètement immobile lors de l'acquisition des images (des mouvements de plus de 2 mm peuvent parfois rendre les données inutilisables), on évite habituellement de leur demander de répondre oralement à des questions (ce qui ferait bouger la tête) et on privilégie les questions à choix de réponse pour lesquelles les participants n'ont qu'à appuyer sur un bouton pour répondre. Également, puisque la variation du signal mesurée peut être de moins de 2 % et que le rapport signal sur bruit n'est pas très grand, il est nécessaire d'avoir plusieurs stimuli (une vingtaine) dans chacune des conditions à l'étude afin de permettre la détection de différences statistiquement significatives. Finalement, à cause du délai de la réponse hémodynamique, il est important de choisir une durée de présentation des stimuli et de pause suffisante.

La tâche cognitive demandée aux participants de cette étude consistait à déterminer (en appuyant sur l'un ou l'autre des boutons) si les images de circuits électriques présentées à l'écran sont correctes ou incorrectes, c'est-à-dire conformes à ce qui se passerait en situation réelle. Les stimuli utilisés dans la tâche étaient composés de circuits électriques conçus de façon à mettre en évidence la conception selon laquelle un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule. Trois types de circuits électriques ont été présentés : les circuits naïfs conformes aux conceptions inappropriées des novices, des circuits scientifiques conformes aux connaissances scientifiques et des circuits de contrôle auxquels les novices et les experts sont censés répondre de la même façon. Pour qu'ils soient similaires, les circuits comportaient tous le même nombre d'ampoules et de fils. Le tableau 3.2 présente quelques exemples d'images tirées des stimuli utilisés dans la tâche.

Tableau 3.2 Exemples de stimuli en électricité utilisés dans la tâche cognitive.

	Film scientifique (max. 6,75 s)	Film naïf (max. 6,75 s)	Film Contrôle (max. 6,75 s)	Période de repos (6,0 s)
Première image	 1,5 s	 1,5 s	 1,5 s	
Dernière image	 max. 2,5 s	 max. 2,5 s	 max. 2,5 s	
Repos entre les images	 2,5 s ou 3,0 s (moyenne 2,75 s)	 2,5 s ou 3,0 s (moyenne 2,75 s)	 2,5 s ou 3,0 s (moyenne 2,75 s)	 Durée totale de la période de repos : 6,0 s

En plus des circuits électriques, la tâche comprenait des images de balles de grandeurs diverses tombant au sol. Ces images, intercalées de façon aléatoire entre les circuits électriques, étaient similaires à celles utilisées par Dunbar, Fugelsang et Stein (2007) dans leur étude portant sur les mécanismes cérébraux liés à l'exertise scientifique en mécanique. À cause d'un nombre insuffisant de participants présentant des conceptions inappropriées en mécanique, les données liées à ces images n'ont fait l'objet d'aucune analyse dans le cadre de cette thèse.

Les stimuli ont été présentés selon un protocole événementiel (Buckner, 1998; Bandetti et Cox, 2000) consistant à alterner de façon aléatoire stimuli naïfs, stimuli scientifiques, stimuli de contrôle et périodes de repos. Il est fait état du

chronométrage des événements au tableau 3.2. On présentait un circuit sans pile pendant 1,5 seconde. Ensuite, une pile était ajoutée au circuit et certaines ampoules s'allumaient et d'autres pas. L'image du circuit électrique avec les ampoules éteintes ou allumées était présentée jusqu'à ce que le participant réponde en appuyant sur un bouton (circuit correct = index de la main droite; circuit incorrect = majeur de la main droite). Après avoir obtenu la réponse du participant, une croix de fixation était présentée pendant 2,5 secondes ou 3,0 secondes pour laisser le temps à la réponse hémodynamique de redescendre. Les périodes de repos alternaient entre 2,5 secondes et 3,0 secondes pour éviter l'habituation du cerveau à une période de repos fixe. Si le participant ne répondait pas après 2,5 secondes, on passait quand même à la période de repos. En plus des périodes de repos entre les stimuli, d'autres, d'une durée de 6,0 secondes, étaient également intégrées dans la tâche.

La tâche comprenait deux séries équivalentes formées des différents types de stimuli. Dans l'ensemble des deux séries, on retrouvait 20 stimuli dans chacune des conditions (circuits naïfs, circuits scientifiques et circuits de contrôle) ainsi que 20 périodes de repos. Entre les deux séries, une pause d'environ trois minutes était accordée au participant. Les stimuli étaient présentés dans un ordre aléatoire.

3.3 Déroulement

Cette section présente les grandes lignes du déroulement des séances d'IRMf vécues par chacun des participants. Le protocole détaillé de ces séances se trouve à l'appendice C.

3.3.1 Présentation des consignes et simulation

Avant l'acquisition des images, le participant se déplaçait dans une salle de simulation où il recevait les instructions liées à la tâche et où il pouvait s'exercer à

répondre à la tâche dans un environnement simulant une séance d'IRMf. Pour assurer l'uniformité des consignes d'un participant à l'autre, elles étaient présentées à l'aide d'un film. Le texte narratif de ce film se trouve à l'appendice D. Après avoir visionné le film, le participant devait répondre à une tâche d'entraînement (comparable à la véritable tâche) présentée sur un écran d'ordinateur posé sur un bureau. Cette tâche de pratique comprenait une dizaine de questions semblables à celles qui ont été posées dans l'appareil d'IRMf. Suite à cette première séance de pratique à l'ordinateur, le participant s'installait ensuite dans le simulateur d'IRMf (un appareil semblable à un appareil d'IRMf mais qui ne prend pas d'images du cerveau) pour répondre une deuxième fois à cette tâche d'entraînement.

3.3.2 Acquisition des images

Dans la salle d'IRMf, les participants s'étendaient sur la table de l'appareil. Des bouchons étaient placés dans leurs oreilles afin de minimiser les bruits émis par l'appareil lors de l'acquisition des images, de même qu'un casque d'écoute qui permettait, en plus d'atténuer le bruit, de communiquer avec le participant à partir de la salle de contrôle adjacente. Pour le confort du participant, des coussins étaient placés sous les genoux et les coudes. Une couverture recouvrait le corps du participant pour éviter qu'il ait froid. Une fois la tête du participant bien positionnée, des coussins en mousse étaient placés de chaque côté de sa tête afin d'en minimiser les mouvements. Une fois le participant installé, la séance d'IRMf débutait.

Cette séance se déroulait en trois étapes :

1. Présentation des images de la série 1 (10 circuits naïfs, 10 circuits scientifiques, 10 circuits de contrôle et 10 période de repos). Durant cette série, des images fonctionnelles ($T2^*$ « spin echo ») ont été acquises à l'aide des paramètres présentés au tableau 3.3.

2. Présentation des images de la série 2 (10 circuits naïfs, 10 circuits scientifiques, 10 circuits de contrôle et 10 période de repos). Comme pour la première série, des images fonctionnelles (T2* « spin echo ») ont été acquises à l'aide des paramètres présentés au tableau 3.3.
3. Pour terminer, des images structurales (T1) ont été acquises à l'aide des paramètres présentés au tableau 3.3. Les images structurales sont essentielles pour la localisation des activations cérébrales de même que pour certaines étapes liées à l'analyse des données, lesquelles sont décrites à la section 3.4.

Tableau 3.3 Paramètres liés à l'acquisition des images.

Paramètres d'acquisition des images fonctionnelles (T2*)	Appareil : Siemens TIM 3,0 T Temps de répétition = 2000 ms Temps d'écho = 30 ms « Flip angle » : 90 degrés Taille des voxels : 3 mm x 3 mm x 3 mm Ordre d'acquisition : « Ascending » Orientation des tranches : « AC-PC line » (« anterior commissure - posterior commissure ») Nombre de tranches : 33 « Field of view » (FOV) : 192 Résolution dans le plan (matrice) : 64 x 64 Antenne de tête : 12 canaux Épaisseur des tranches : 3,0 mm Espace entre les tranches : 25 % (0,8 mm)
Paramètres d'acquisition des images structurales (T1)	Appareil : Siemens TIM 3,0 T Temps de répétition = 2300 ms Temps d'inversion = 900 ms (« inversion time ») Temps d'écho = 30 ms « Flip angle » : 9 degrés Taille des voxels : 1,0 x 1,0 x 1,2 mm Ordre d'acquisition : « interleaved » Orientation des tranches : sagittale Nombre de tranches : 160 « Field of view » : 256 Résolution dans le plan (matrice) : 240 x 256 Antenne de tête : 12 canaux

3.4 Analyse des données

L'analyse des données nécessite différentes étapes de prétraitement (correction du mouvement, lissage, normalisation) et de traitement (application du modèle linéaire général) présentées dans cette section. L'ensemble des étapes d'analyse a été réalisé à l'aide du logiciel SPM8 développé par le *Wellcome Trust Centre for Neuroimaging* fonctionnant avec MATLAB 7.4. La figure 3.1 présente le résumé des différentes étapes de prétraitement et de traitement des données.

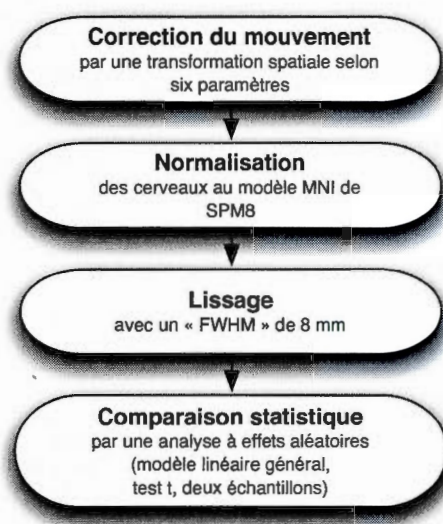


Figure 3.1 Aperçu de l'analyse des données réalisée à l'aide de SPM8.

3.4.1 Correction du mouvement

Afin d'être en mesure de les comparer les unes aux autres, les images doivent être corrigées pour le mouvement, puisque même un déplacement de la tête de l'ordre de 2 mm peut nuire aux analyses. Pour y arriver, nous avons utilisé l'algorithme de SPM8 développé par Friston, Williams, Howard, Frackowiak et Turner (1996), lequel considère que le cerveau est un objet rigide et applique des transformations spatiales

selon six paramètres (trois paramètres liés aux translations en x, y et z, et trois liés aux trois angles possibles de rotation de la tête) pour aligner les images d'une série par rapport à une image de référence. En réalisant une correction du mouvement, on s'assure qu'une région du cerveau est à la même position durant toute la période d'acquisition des données, ce qui est essentiel pour réaliser les analyses.

3.4.2 Normalisation

Pour permettre de moyenniser les données de plusieurs sujets et comparer leur activité cérébrale, il faut procéder à une normalisation des cerveaux des individus. En effet, puisque chaque cerveau présente une forme différente et que pourtant nous voulons comparer l'activation de régions très précises, il est nécessaire de modifier les images du cerveau de chacun des sujets pour qu'elles montrent toutes des cerveaux de même largeur, longueur, etc. Les logiciels permettant d'accomplir la normalisation repèrent les contours d'une image de référence et les contours des images du cerveau à transformer. Le cerveau de référence que nous avons utilisé est celui du *Montreal Neurological Institute* présent dans SPM8. Après avoir identifié les contours, les logiciels les normalisent afin qu'ils soient similaires à l'image de référence. Pour cette recherche, la procédure de segmentation développée par Ashburner et Friston (2005) a été utilisée pour la normalisation.

3.4.3 Lissage

Une fois la correction du mouvement et la normalisation terminées, il est nécessaire d'améliorer le rapport signal sur bruit en procédant à un lissage des données. Ce lissage consiste à répartir le signal de chacun des voxels du cerveau aux voxels environnants. Pour ce faire, on répartit le signal selon une fonction gaussienne d'une largeur que nous avons fixée à 8 mm à la moitié de la hauteur maximale. En plus d'améliorer le rapport signal sur bruit en diminuant les pics ayant des intensités

extrêmes et en renforçant la valeur des voxels fortement activés entourés de voxels qui sont eux aussi fortement activés, cela diminue les risques de considérer des artefacts comme des régions étant significativement activées. Un autre avantage considérable du lissage est de faciliter la détection de régions qui sont activées chez plusieurs sujets. En effet, comme chaque cerveau est différent, le lissage permet d'éviter la situation où un voxel n'est pas significativement activé parce que la région cérébrale d'intérêt ne se trouve pas exactement dans les mêmes voxels d'une personne à l'autre.

3.4.4 Modèle linéaire général

Une fois que les données ont été corrigées pour le mouvement, lissées et normalisées, nous avons pu évaluer si des régions étaient significativement activées à partir d'un test-t. Les analyses statistiques ont reposé sur le modèle linéaire général dans lequel on suppose que les données (y) sont modélisables à partir de la combinaison linéaire de différents facteurs (x_i) ayant différentes pondérations (β_i) ainsi qu'une certaine variabilité inexpliquée par le modèle (ε).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (1)$$

Les facteurs dépendent du design de l'expérience, c'est-à-dire de l'ordre de présentation des stimuli (départ, durée, etc.), mais aussi d'autres facteurs, tels l'activation de base (au repos) et des facteurs associés à la dérive temporelle du signal liée à l'appareillage. Nous avons également intégré les paramètres de la correction du mouvement à l'intérieur du modèle. Les facteurs qui dépendent du design ont été modélisés en multipliant la fonction de la réponse hémodynamique (c'est-à-dire la façon dont le signal augmente progressivement à partir du début de la présentation du stimulus jusqu'à son déclin progressif quelques secondes après la présentation du stimulus). Ensuite, par la méthode des moindres carrés, nous avons obtenu les valeurs des différentes pondérations (β) qui minimisent ε . Sous forme matricielle comprenant les valeurs de tous les voxels à tous les temps, on obtient :

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

Pour déterminer quelles sont les régions qui étaient significativement activées, c'est-à-dire si β était significativement plus grand que zéro, nous avons utilisé un test-t :

$$t = \text{Moyenne}(\beta) / \text{Écart-type}(\text{Moyenne}(\beta)) \quad (3)$$

Pour déterminer s'il existe une différence significative entre deux régions ou deux groupes, nous avons utilisé aussi un test-t en utilisant $\beta_a - \beta_b$ au lieu de β .

La détermination du seuil de significativité est problématique en raison du nombre considérable de voxels impliqués (par exemple, $n = 100\,000$). Si l'on fixe le seuil à $p = 0,05$, il y aura un nombre considérable de voxels qui paraîtront avoir été significativement activés (5000), mais qui ne l'auront pas été. Si l'on applique la correction de Bonferroni pour les comparaisons multiples,

$$\alpha_{bon} = \alpha/n \quad (4)$$

on obtient $p_{bon} = 0,05/100\,000 = 0,000\,000\,5$, ce qui est trop strict et risque d'augmenter les chances que des régions cérébrales ne paraissent pas significativement activées, alors qu'en réalité elles le sont. La correction de Bonferroni est pertinente si l'on postule que tous les voxels sont indépendants, mais ce n'est pas le cas ici. D'abord, les voxels adjacents sont fortement corrélés (pour des raisons physiologiques, mais aussi pour des raisons techniques liées à la saisie du signal d'IRMf) et, ensuite, puisqu'un lissage spatial est appliqué aux données, les voxels deviennent nécessairement corrélés les uns aux autres. Une solution courante dans les études de neuroimagerie consiste à utiliser un compromis entre le seuil classique de $p = 0,05$ et le seuil trop strict de $p = 0,000\,000\,5$ en fixant le seuil à $p = 0,001$. À moins d'un avis contraire, tous les résultats rapportés dans cette thèse utilisent le seuil $p = 0,001$.

Puisque nous ne voulons pas connaître l'activité cérébrale d'un seul individu, mais plutôt celle d'un groupe, il a fallu trouver la moyenne des résultats de

l'ensemble des participants de chacun des deux groupes. Pour ce faire, dans un premier temps, une analyse de premier niveau (ou analyse intra-sujet) a été menée à l'aide de SPM8. Cette analyse a permis de combiner les images obtenues au cours des séries 1 et 2. De cette façon, nous avons une carte statistique pour chacun des sujets et pour chacune des comparaisons statistiques souhaitées. Cette analyse a permis d'obtenir l'activité cérébrale de chacun des individus.

Pour connaître l'activité cérébrale d'un groupe ou pour comparer les activités cérébrales de deux groupes, il n'est pas souhaitable de réaliser une analyse de premier niveau puisque ce type d'analyse, appropriée aux analyses intra-sujets, ne permet pas de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble d'une population (Huettel, Song et McCarthy, 2004). En fait, puisque l'analyse de premier niveau est très sensible aux données extrêmes, il n'est pas possible d'extrapoler les résultats obtenus à l'ensemble de la population à l'étude. Si, par exemple, nous avons trois sujets sur un échantillon de 10 sujets qui réagissent fortement aux stimuli, une analyse de premier niveau mènerait à obtenir des résultats statistiquement significatifs pour l'ensemble du groupe, et ce, même si sept des sujets n'ont que faiblement réagi à la tâche.

Pour résoudre ce problème, nous avons eu recours à des analyses de second niveau (test t à deux échantillons). Pour qu'une différence significative soit observée à l'aide de ce type d'analyse, il faut que l'effet observé soit présent de façon importante chez tous les participants à l'étude; les participants réagissant fortement ne peuvent pas compenser pour ceux qui ne réagissent que faiblement à la tâche. Ce type d'analyse est plus approprié lorsqu'on veut généraliser les résultats obtenus à l'ensemble d'une population. Ce type d'analyse a permis comparer le groupe d'experts avec celui des novices en sciences.

3.5 Considérations éthiques

Aucune difficulté éthique particulière n'est soulevée par le projet. Les conditions imposées par l'utilisation de l'IRMf peuvent entraîner un certain inconfort du fait de devoir rester immobile pendant l'examen et en raison du bruit que génère le fonctionnement de l'appareil. L'inconfort lié au bruit a pu être minimisé par l'utilisation de bouchons. Le sujet pouvait aussi ressentir un certain stress ou une sensation de claustrophobie. Pour minimiser ce stress, une séance de pratique et d'acclimatation avec un simulateur d'IRMf a eu lieu, pour chaque sujet, juste avant la cueillette des données.

Cette étude a reçu les approbations éthiques de l'UQAM et de l'UNF et a été menée conformément au projet déposé. Le formulaire de consentement tel qu'il a été approuvé se trouve à l'appendice B.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Ce quatrième et dernier chapitre présente les résultats obtenus et discute de leurs retombées sur l'apprentissage et l'enseignement des sciences

4.1 Résultats

4.1.1 Résultats comportementaux

Le tableau 4.1 présente les taux de réussite des participants novices et experts aux différents types de circuits électriques : naïfs, scientifiques et de contrôle. Pour les circuits naïfs, les novices ont obtenu un taux de réussite moyen de 0,42/20, tandis que les experts ont obtenu 19,73/20. Pour les circuits scientifiques, les résultats sont similaires : les novices ont obtenu un taux de réussite moyen de 0,83/20, alors que les experts ont obtenu 18,64/20. Les taux de réussite des circuits de contrôle sont comparables chez les novices et les experts : les premiers ayant obtenu 19,58/20 et, les seconds, 19,55/20 ($t = -0,122$, $p = 9,04$).

Le tableau 4.2 présente les temps de réaction des participants experts et novices aux trois types de circuits électriques. Le temps de réaction est le temps écoulé entre le début de la présentation d'un stimulus et le moment où le participant appuie sur le bouton pour donner sa réponse. Plus le temps de réaction est petit, plus les participants répondent rapidement. En général, les experts ont répondu plus rapidement que les novices, et ce, pour l'ensemble des trois types de circuits. Pour les circuits naïfs, le temps de réaction moyen, c'est-à-dire la moyenne de la moyenne des temps de réaction obtenus par chacun des participants à l'ensemble des stimuli d'un type particulier de circuit, est de 2,799 s pour les novices et de 2,375 s pour les

experts. Cette différence est statistiquement significative ($t = 4,027$, $p = 0,001$). Lors de la présentation de circuits scientifiques, la différence de temps de réaction entre les experts et les novices est aussi significative, 2,432 s pour les experts contre 2,885 s pour les novices ($t = 3,649$, $p = 0,001$). Alors que les taux de réussite des circuits de contrôle sont comparables, les temps de réaction ne le sont pas et montrent que les experts ont répondu plus rapidement à ce type de circuits également. Cette différence (2,653 s pour les novices contre 2,430 s pour les experts) est cependant moins importante que pour les autres types de circuits, mais demeure tout de même statistiquement significative ($t = 2,953$, $p = 0,008$).

Tableau 4.1 Taux de réussite des participants pour les trois types de circuits électriques.

Circuits	Novices				Expert				Différence Test t (deux éch.)
	Min (sur 20)	M (sur 20)	Écart-type (sur 20)	Max (sur 20)	Min (sur 20)	M (sur 20)	Écart-type (sur 20)	Max (sur 20)	
Naïfs	0,00	0,42	0,79	2,00	17,00	19,73	0,90	20,00	t = 54,56, p < 0,001
Scientifiques	0,00	0,83	1,19	4,00	17,00	18,64	0,67	19,00	t = 43,47, p < 0,001
Contrôle	18,00	19,58	0,79	20,00	18,00	19,55	0,69	20,00	t = -0,12, p = 0,904

Tableau 4.2 Temps de réaction des participants pour les trois types de circuits électriques.

Circuits	Novices				Expert				Différence Test t (deux éch.)
	Min (s)	M (s)	Écart-type (s)	Max (s)	Min (s)	M (s)	Écart-type (s)	Max (s)	
Naïfs	2,428	2,799	0,275	3,262	2,083	2,375	0,225	2,748	t = 4,027, p = 0,001
Scientifiques	2,472	2,885	0,351	3,540	2,145	2,432	0,223	2,960	t = 3,649, p = 0,001
Contrôle	2,372	2,653	0,189	2,978	2,177	2,430	0,170	2,767	t = 2,953, p = 0,008

Note. La moyenne (M) est la moyenne de la moyenne des temps de réaction de chacun des participants. Le test t à deux échantillons a été réalisé sur les temps de réaction moyens de chacun des participants à chacun des types de circuits électriques.

4.1.2 Résultats neurologiques

Le tableau 4.3 montre les régions cérébrales qui sont significativement plus activées chez les experts et chez les novices ($p < 0,001$, seuil non corrigé pour les comparaisons multiples, minimum 10 voxels, test t à deux échantillons, analyse à effets aléatoires ou de second niveau).

En règle générale, les activations sont plus importantes chez les experts que chez les novices, en particulier lors de la présentation de circuits naïfs où l'on retrouve de nombreuses régions plus activées : le cortex préfrontal ventrolatéral gauche (BA²⁴ 45); le cortex temporal milieu droit ou gyrus angulaire (BA 39); le cortex frontal médial gauche (BA 6); le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (BA 9), une région qui se situe à la jonction du gyrus lingual et du cortex occipito-temporal (ou gyrus fusiforme) gauche et droit, non loin de la partie postérieure de l'hippocampe; et, finalement, le CCA (BA 32). Lors de la présentation de circuits scientifiques ou lors des périodes de fixation d'une croix, aucune région cérébrale n'était significativement plus activée chez les experts. Lors de la présentation des circuits de contrôle, une seule région est plus activée chez les experts; il s'agit du gyrus temporal milieu droit ou gyrus angulaire (BA 39), région qui était également davantage activée chez l'expert lors de la présentation des circuits naïfs.

Chez les novices, une seule région est significativement plus activée par rapport aux experts : le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (BA 46), qui est plus activé lors de la présentation de circuits scientifiques et de circuits contrôle. La présentation de circuits naïfs ou de croix de fixation n'engendre aucune augmentation significative de l'activité cérébrale chez les novices.

²⁴ Brodmann area

Tableau 4.3 Régions cérébrales significativement plus activées chez les experts et les novices pour les différents types de stimuli présentés.

Régions cérébrales	x	y	z	Valeur de t
Experts > Novices				
Circuits naïfs				
Cortex préfrontal ventrolatéral gauche (BA 45)	-48	27	0	4,91
Cortex temporal milieu droit ou gyrus angulaire (BA 39)	48	-78	18	4,81
Cortex frontal médial gauche (BA 6)	-3	48	33	4,62
Cortex préfrontal dorsolatéral gauche (BA 9)	-9	60	24	4,42
Gyrus lingual/Cortex occipito-temporal (fusiforme) gauche	-15	-54	-6	4,42
Gyrus lingual/Cortex occipito-temporal (fusiforme) droit	15	-57	-6	4,37
Cortex cingulaire antérieur droit (BA 32)	9	45	3	4,09
Circuits scientifiques				
Aucune région significativement plus activée				
Circuits de contrôle				
Cortex temporal milieu/Gyrus angulaire droit (BA 39)	45	-72	15	4,92
Point de fixation (« + »)				
Aucune région significativement plus activée				
Novices > Experts				
Circuits naïfs				
Aucune région significativement plus activée				
Circuits scientifiques				
Cortex préfrontal dorsolatéral gauche (BA 46)	-27	39	6	5,99
Circuits de contrôle				
Cortex préfrontal dorsolatéral gauche (BA 46)	-30	42	6	4,96
Point de fixation (« + »)				
Aucune région significativement plus activée				

Note : $p < 0,001$, non corrigé, minimum 10 voxels, analyse à effets aléatoires (aussi appelée analyse de second niveau), coordonnées dans l'espace MNI de SPM8.

La figure 4.1 met en évidence la particularité des stimuli naïfs pour les experts. En effet, peu de différences d'activité cérébrale sont observées entre les experts et les novices pour les périodes de fixation, les stimuli scientifiques et les stimuli de contrôle. Par contre, il y a de nombreuses régions cérébrales significativement plus activées chez les experts lors de l'évaluation de circuits naïfs, c'est-à-dire de circuits respectant la fausse croyance des novices selon laquelle un seul fil est nécessaire pour allumer une ampoule. Ces régions davantage activées chez les experts sont principalement des régions du lobe frontal (cortex préfrontal ventrolatéral et dorsolatéral gauche, CCA droit et cortex frontal médial gauche). En plus de ces régions antérieures, deux autres régions, situées plutôt dans le lobe temporal droit, sont significativement plus activées chez les experts : le cortex temporal milieu/gyrus angulaire droit et le gyrus lingual/cortex occipito-temporal droit. Les activations du lobe frontal se situent dans l'hémisphère gauche (à l'exception du CCA dont l'activation se fait plutôt dans l'hémisphère droit). Le gyrus lingual/cortex occipito-temporal est la seule région à être activée de façon bilatérale, c'est-à-dire à la fois dans l'hémisphère gauche et dans l'hémisphère droit.

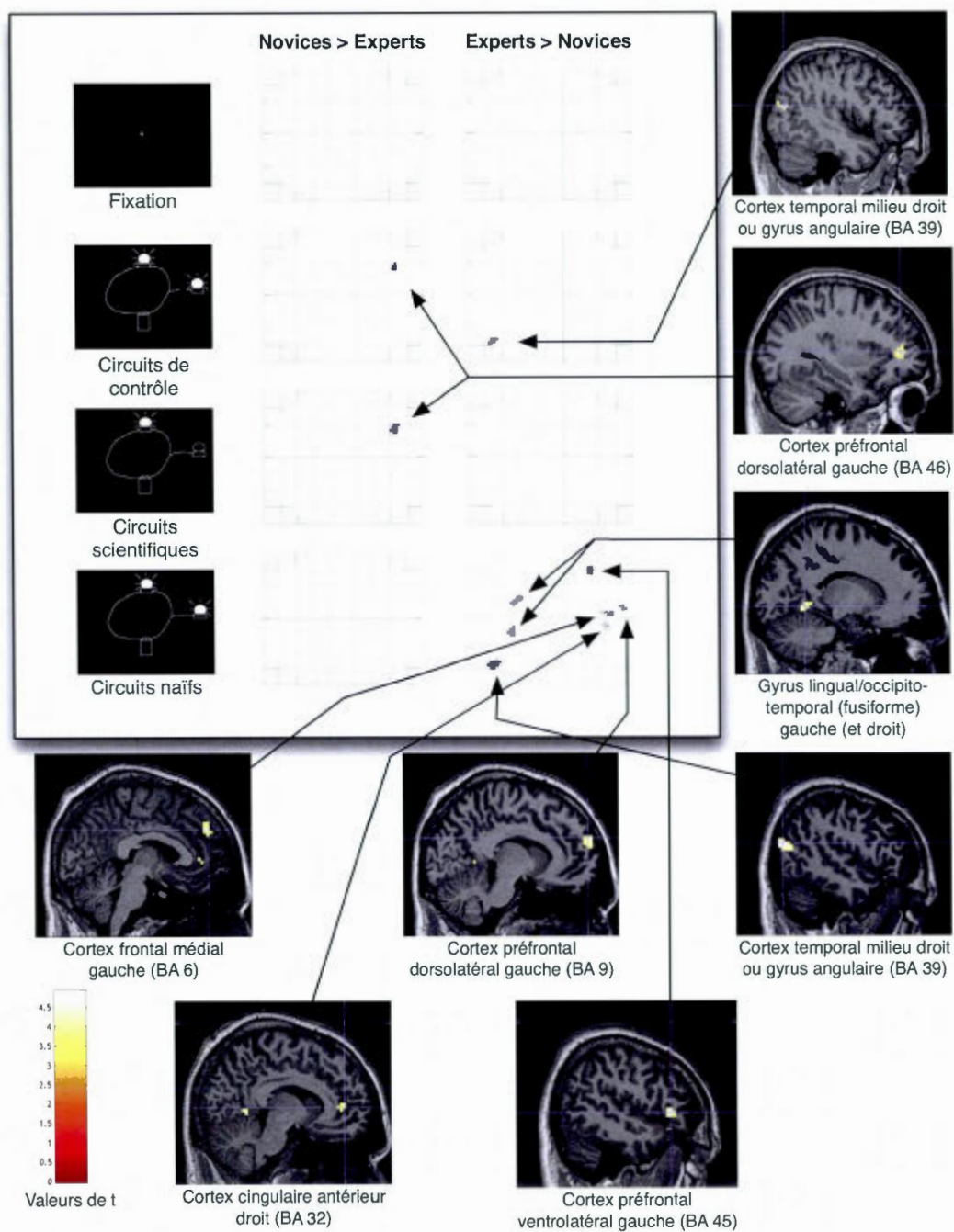


Figure 4.1 Régions cérébrales significativement plus activées chez les experts et les novices pour les différents types de stimuli présentés ($p < 0,001$, non corrigé, minimum 10 voxels, analyse à effets aléatoires aussi appelée analyse de second niveau).

Le tableau 4.4 et la figure 4.2 présentent les régions cérébrales qui sont significativement plus activées dans une condition par rapport à une autre ($p < 0,001$, seuil non corrigé, minimum 10 voxels, analyse à effets aléatoires, coordonnés dans l'espace MNI de SPM8). Chez les experts, nous observons que le cortex occipito-temporal droit (BA 19) et le lobe pariétal supérieur s'étendant jusqu'au précunéus gauche (BA 7) sont significativement plus activés lors de la présentation de circuits naïfs que lors de la présentation de circuits scientifiques. Également, les circuits électriques de contrôle activent significativement plus que les circuits scientifiques et les circuits naïfs de larges régions cérébrales, dont le lobe pariétal inférieur gauche (BA 39/40), le gyrus temporal moyen droit (BA 37) et le gyrus frontal supérieur gauche (BA 6/8). Les contrastes *Circuits scientifiques > circuits naïfs*, *Circuits naïfs > circuits de contrôle* et *Circuits scientifiques > circuits de contrôle* ne montrent aucune région significativement plus activée.

Pour les novices, et contrairement aux experts, on ne mesure aucune différence significative pour le contraste *Circuits naïfs > circuits scientifiques*. Par contre, on observe que le lobe pariétal inférieur gauche (BA 40), le noyau lentiforme droit, le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (BA 9/10) et le thalamus droit sont significativement plus activés lors de la présentation de circuits scientifiques que lors de la présentation de circuits naïfs. Chez les experts, aucune différence n'avait été identifiée pour ce contraste. Le gyrus parahippocampique droit qui s'étend au gyrus lingual droit se montre plus activé chez les novices lors de la présentation de circuits naïfs que lors de la présentation de circuits de contrôle. Comme dans le cas des experts, on remarque que les circuits de contrôle provoquent des activations significativement plus grandes que les circuits naïfs et scientifiques, et ce, dans de larges régions cérébrales, dont le gyrus temporal moyen gauche (BA 39/37) et droit (BA 37) et le noyau lentiforme droit. Aucune différence significative d'activation n'a

été observée pour les contrastes *Circuits naïfs* > *circuits scientifiques* et *Circuits scientifiques* > *circuits de contrôle*.

Tableau 4.4 Régions cérébrales significativement plus activées dans une condition par rapport à une autre.

Régions cérébrales	x	y	z	Valeur de t
Experts				
Circuits naïfs > circuits scientifiques				
Cortex occipito-temporal droit (BA 19)	21	-48	-6	5,37
Lobe pariétal supérieur/précunéus gauche (BA 7)	-12	-51	66	5,36
Circuits scientifiques > circuits naïfs				
Aucune région significativement plus activée				
Circuits naïfs > circuits de contrôle				
Aucune région significativement plus activée				
Circuits scientifiques > circuits naïfs				
Aucune région significativement plus activée				
Circuits de contrôle > circuits naïfs				
Lobe pariétal inférieur/gyrus supramarginal gauche (BA 39/40)	-60	-48	36	10,74
Gyrus temporal moyen droit (BA 37)	54	-57	-3	7,17
Gyrus frontal supérieur gauche (BA 6/8)	-12	27	51	6,65
Circuits de contrôle > circuits scientifiques				
Plusieurs régions postérieures significativement plus activées (voir figure 4.2)				
Novices				
Circuits naïfs > circuits scientifiques				
Aucune région significativement plus activée				
Circuits scientifiques > circuits naïfs				
Lobe pariétal inférieur/sillon latéral (près du GA) (BA 40)	-54	-48	33	7,16
Noyau lentiforme droit (putamen)	24	0	-3	6,47
Cortex préfrontal dorsolatéral gauche (BA 9/10)	-30	60	21	6,12
Thalamus (pulvinar)	15	-12	12	5,23
Circuits naïfs > circuits de contrôle				
Gyrus lingual/gyrus parahippocampique	30	-48	6	5,42
Circuits scientifique > circuits de contrôle				
Aucune région significativement plus activée				
Circuits de contrôle > circuits naïfs				
Gyrus temporal moyen droit (BA 37)	51	-45	-3	4,67
Gyrus temporal moyen gauche (BA 39/37)	-39	-72	15	4,20
Noyau lentiforme droit (putamen)	24	6	3	4,10
Circuits de contrôle > circuits scientifiques				
Plusieurs régions postérieures significativement plus activées (voir figure 4.2)				

Note : $p < 0,001$, non corrigé, minimum 10 voxels, analyse à effets aléatoires (aussi appelée analyse de second niveau), coordonnées dans l'espace MNI de SPM8.

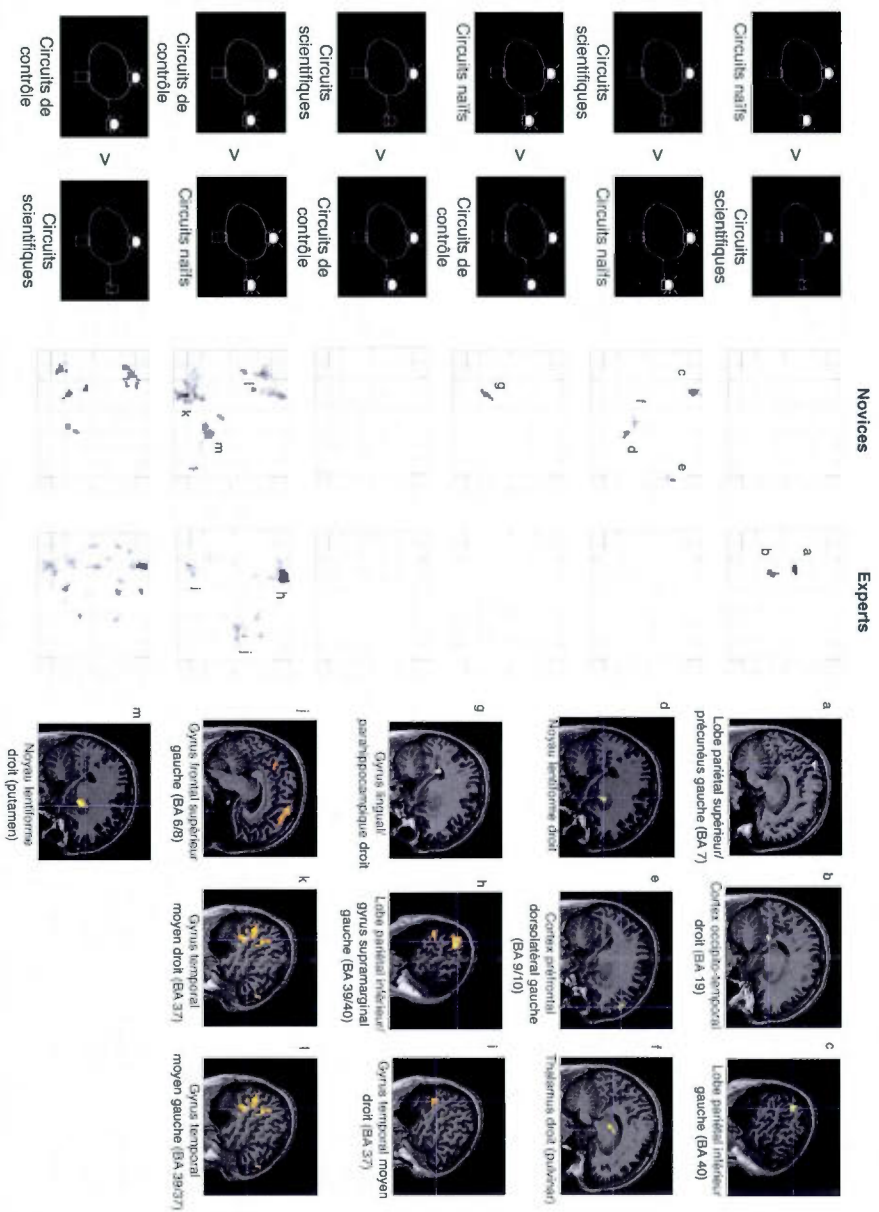


Figure 4.2 Régions cérébrales significativement plus activées dans une condition par rapport à une autre ($p < 0.001$, non corrigé, minimum 10 voxels, analyse à effets aléatoires aussi appelée analyse de second niveau).

4.2 Interprétation des résultats

Après avoir présenté les données comportementales et neurologiques à la section précédente, les données sont ici interprétées et discutées dans trois sous-sections : (1) expertise scientifique en électricité et fonctionnement du cerveau, (2) expertise scientifique en électricité et conceptions inappropriées et (3) expertise scientifique en électricité et inhibition.

4.2.1 Expertise scientifique en électricité et fonctionnement du cerveau

4.2.1.1 Différences observées entre les experts et les novices

Les résultats obtenus mènent à penser que le cerveau des experts ne fonctionne pas de la même façon que celui des novices. Lorsqu'on présente aux participants des circuits électriques scientifiques ou de contrôle, le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (BA 46) est plus activé chez les novices que chez les experts. Cette région est généralement associée à la mémoire de travail, et plus particulièrement à la manipulation et à la sélection d'information (Blumenfeld et Ranganath, 2006; Curtis et D'Esposito, 2003; Rowe *et al.*, 2000). Pour ces circuits, il se pourrait donc que les experts soient plus efficaces à sélectionner les éléments essentiels de la situation et à prendre une décision rapidement, sans recourir de façon importante à leur mémoire de travail.

Lors de la présentation de circuits électriques naïfs ou de contrôle, les experts activent davantage le gyrus angulaire droit que les novices. Alors que le gyrus angulaire gauche est associé à l'expertise en mathématique (Grabner *et al.*, 2007), à la conversion des graphèmes de l'écriture en phonèmes (Beaulieu *et al.*, 2005), à la compréhension de la parole (Wernicke, 1874) et à la récupération de faits arithmétiques (Grabner *et al.*, 2009), le rôle du gyrus angulaire droit est pour sa part

moins bien connu. Nous savons par contre que le gyrus angulaire (le gauche comme le droit) est une région dite associative, pouvant servir de relais entre les régions occipitales, pariétales et temporales. Nous savons aussi que la région temporo-pariétale droite (qui inclut notamment le gyrus angulaire) joue un rôle dans l'attribution de croyances ou d'intentions à d'autres personnes (Saxe, Whitfield-Gabrieli, Scholz et Pelphrey, 2009), dans la réorientation de l'attention (Mitchell, 2007) et dans la sensation d'être à l'extérieur de son propre corps (Blanke *et al.*, 2005). Dans tous les cas, l'activation de la région temporo-pariétale semble associée à une réorientation de l'attention des stimuli externes vers un processus de réflexion interne. Dans notre recherche, il se pourrait donc que l'activation plus importante du gyrus angulaire droit permette aux experts d'associer efficacement des informations visuospatiales, liées aux circuits électriques, avec des informations « internes », sans doute situées dans le lobe temporal et peut-être liées aux connaissances antérieures.

Nos résultats mettent en évidence d'autres différences significatives entre les experts et les novices. Lorsqu'on présente des circuits naïfs, les experts ne possèdent non pas une, mais plusieurs régions cérébrales ayant une activité plus élevée que celle des novices en sciences. Les sections 4.2.2 et 4.2.3 discuteront en détails de ces activations.

Somme toute, les résultats appuient l'idée qu'il existe des différences d'activité cérébrale significatives entre les experts et les novices en sciences. Cependant, il y a une situation où aucune différence n'a été détectée, soit lors des périodes de fixation. En effet, lorsque les novices et les experts regardent un point de fixation au centre de l'écran, l'on n'observe pas de différences d'activité cérébrale : les cerveaux des participants des deux groupes se comportent de la même façon. Les différences cérébrales observées ne sont donc pas observables dans tous les contextes. Il est possible que seules les questions liées à des connaissances scientifiques

engendrent une activité cérébrale différente chez les deux groupes. Il est intéressant aussi de noter que l'ampleur des différences cérébrales n'est pas constante et dépend des questions posées aux participants. Par exemple, les différences cérébrales sont beaucoup plus marquées lors de l'évaluation de circuits naïfs que dans les autres situations.

4.2.1.2 Causes possibles aux différences observées entre les experts et les novices

Les différences observées entre le fonctionnement du cerveau des experts et des novices sont peut-être dues à la formation scientifique, très différente, reçue par les participants des deux groupes et à l'apprentissage qui en a découlé. En effet, puisque les participants des deux groupes ont le même âge moyen, les différences observées ne sont probablement pas dues à des différences d'âge ou de maturité cérébrale (quoiqu'il soit possible d'observer des différences de maturité cérébrale chez des individus du même âge). De plus, les individus des deux groupes sont tous des hommes droitiers, ce qui enlève la possibilité que les différences soient associées à la présence d'un nombre plus important d'hommes ou de femmes, ou de gauchers ou droitiers, dans l'un ou l'autre des deux groupes.

Par contre, les différences observées ont peut-être d'autres causes que celle de la formation scientifique. Par exemple, les experts recrutés dans cette étude sont presque tous des étudiants de deuxième et troisième année du baccalauréat en physique et, puisque que le taux d'abandon des études en première année est probablement supérieur au baccalauréat en physique que dans la plupart des baccalauréats en sciences humaines, il est possible que cela mène à un déséquilibre au niveau des aptitudes intellectuelles entre le groupe des experts et celui des novices. Cette idée est soutenue notamment par le fait que les experts en physique présentent une cote R moyenne associées aux études collégiales un peu plus importante que celle des novices. Cependant, puisque les deux groupes sont formés d'étudiants de niveau

universitaire ayant réussi leurs études secondaires et collégiales et démontrant donc d'importantes habiletés intellectuelles, il semble peu plausible que les différences enregistrées soient uniquement associées à des différences de nature héréditaire ou socioéconomique.

Une autre cause possible serait que les étudiants qui décident de poursuivre des études universitaires en physique sont peut-être, avant même le début de leur formation scientifique, différents de ceux qui décident de poursuivre des études en sciences humaines, non pas au niveau des aptitudes intellectuelles, mais au niveau de leurs intérêts et peut-être même de leur mode pensée (« brain type », Billington, Baron-Cohen et Wheelwright, 2007). Une étude menée par Zeyer et Wolf (2010) a d'ailleurs démontré qu'un mode de pensée systématique (en opposition à empathique) est souvent associé à une plus grande motivation à apprendre les sciences.

Ceci dit, un nombre grandissant de recherches montrent que l'apprentissage de la lecture (Carreiras *et al.*, 2009; Castro-Caldas, Petersson, Reis, Stone-Elander et Ingvar, 1998; Turkeltaub, Gareau, Flowers, Zeffiro et Eden, 2003) et du calcul (Ansari, 2008; Zamarian, Ischebeck et Delazer, 2009) modifie considérablement la structure et le fonctionnement du cerveau. Il n'est donc pas impossible que l'apprentissage des sciences mène à des modifications cérébrales similaires. Cependant, puisque notre étude n'a pas comparé directement l'activité cérébrale avant et après un apprentissage des sciences, il n'est pas possible d'en avoir la certitude. Davantage d'études seront donc nécessaires avant de pouvoir attribuer les différences cérébrales observées ici à la formation scientifique reçue ou à une autre cause.

4.2.2 Expertise scientifique en électricité et conceptions inappropriées

4.2.2.1 Hypothèse de la nécessité d'un effort cérébral particulier chez les experts

Le résultat neurologique le plus manifeste lorsqu'on regarde les données présentées à la figure 4.1 est celui concernant la présentation de circuits naïfs qui engendre une activité cérébrale très différente chez l'expert par rapport au novice. En effet, lors de la présentation des circuits de contrôle, une seule région est significativement plus activée chez les experts que chez les novices, le gyrus angulaire droit et, lors de la présentation des circuits scientifiques, aucune région ne s'est avéré significativement plus activée chez l'expert. Par contre, lors de la présentation de circuits naïfs (« un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule connectée à une pile »), on observe pas moins de six régions cérébrales significativement plus activées chez les experts que chez les novices, ce qui laisse entendre que le cerveau des experts traite ce type de circuit électrique d'une façon particulière.

Spontanément, on pourrait pourtant s'attendre à ce que les novices, moins familiers avec l'évaluation de circuits électriques, aient besoin d'activer davantage que les experts certaines régions cérébrales en lien avec l'attention, la mémoire de travail et la prise de décision. Nos résultats montrent d'ailleurs que c'est en partie le cas : lors de la présentation de circuits scientifiques, les novices activent effectivement davantage le cortex préfrontal dorsolatéral, qui est une région liée à la mémoire de travail, à l'attention et au contrôle cognitif (Miller et Cohen, 2001). Cette même région est aussi plus activée chez les novices lors de la présentation de circuits de contrôle. Par contre, lorsque des circuits naïfs sont présentés, aucune région n'est significativement plus activée chez les novices.

En fait, non seulement les novices n'activent aucune région cérébrale significativement plus que les experts lors de la présentation de circuits naïfs, mais les résultats montrent une activité cérébrale significativement plus importante chez les experts dans de nombreuses régions cérébrales. Il n'est donc peut-être pas si facile, pour les experts, d'évaluer ces circuits naïfs, qui apparaissent pourtant particulièrement simples aux yeux de n'importe quel physicien.

Nous faisons ici l'hypothèse que, si les experts activent significativement plus certaines régions du cerveau que les novices, c'est parce qu'ils ont besoin de fournir un effort cérébral particulier pour arriver à évaluer correctement les circuits naïfs.

Les résultats présentés au tableau 4.4 et à la figure 4.2 (qui montrent les régions cérébrales significativement plus activées dans une condition par rapport à une autre) s'opposent en apparence à l'interprétation proposée selon laquelle les experts auraient besoin d'un effort cérébral particulier pour évaluer les circuits naïfs. La figure 4.2 montre notamment qu'aucune région du cerveau de l'expert ne s'active davantage pour le contraste *Circuits naïfs > circuits de contrôle*. Cependant, l'idée soutenue ici n'est pas que l'évaluation de circuits naïfs active davantage que les circuits de contrôle certaines régions cérébrales chez les experts, mais plutôt que ces derniers activent davantage que les novices certaines régions cérébrales lors de l'évaluation de circuits naïfs. Si aucune région cérébrale n'est plus activée chez les experts pour le contraste *Circuits naïfs > circuits de contrôle*, c'est probablement parce que le cerveau des experts a besoin d'accomplir, du moins en partie, un travail cérébral similaire dans les deux conditions : par exemple, un travail d'inhibition des conceptions inappropriées dans le cas des circuits naïfs et peut-être un travail d'inhibition de la tendance à dire que le circuit est correct si les deux ampoules s'allument, dans celui des circuits de contrôle. Chez les novices, l'évaluation de circuits de contrôle implique peut-être le même travail d'inhibition que chez les

experts (ce serait pour cette raison qu'on observe peu de différences entre les experts et les novices pour ces circuits). Par contre, pour les circuits naïfs, le travail cérébral des novices est sans doute différent par rapport à celui des experts, parce qu'il ne semble pas nécessiter d'inhibition. Ainsi, lorsque l'on compare l'activité cérébrale des experts et des novices (4.1), on remarque très peu de différences lors de l'évaluation de circuits de contrôle, mais plusieurs régions s'avèrent plus activées chez l'expert lors de la présentation de circuits naïfs.

Généralement, lorsqu'un effort cérébral particulier est nécessaire, les temps de réaction augmentent. Dans cette recherche, les temps de réaction des experts sont pourtant significativement plus courts que ceux des novices et ce, même lors de la présentation de circuits naïfs. Il se pourrait donc que les experts, à cause de leur formation scientifique poussée, aient développé la capacité d'analyser visuellement et de comprendre beaucoup plus rapidement que les novices la signification des circuits électriques présentés. Il est également possible que l'effort cérébral particulier que nécessite l'évaluation des circuits naïfs chez les experts ne requière que peu de temps. Nous savons, par exemple, que le développement de la capacité d'inhibition mène à une diminution des temps de réaction dans les tâches nécessitant cette capacité, comme la tâche de Stroop (1935). Alors, même si les experts ont besoin de fournir un effort particulier, il est possible que les temps de réaction des novices (qui incluent le temps associé au traitement visuel, à l'analyse et à la sélection d'une réponse) soient supérieurs à ceux des experts (qui incluent pourtant une étape supplémentaire d'analyse : traitement visuel, analyse, effort cérébral particulier et sélection d'une réponse).

4.2.2.2 Analyse des hypothèses alternatives

Cette section présente les hypothèses alternatives à celle de la nécessité d'un effort cérébral particulier chez l'expert.

Une première hypothèse alternative serait que les experts ne fournissent pas un effort particulier, mais qu'ils utilisent plutôt une stratégie de résolution de problème différente de celle des novices. Cependant, si tel était le cas, on aurait observé des régions cérébrales, associées à la stratégie des novices, significativement plus activées chez ces derniers. Or, aucune région n'est plus activée chez le novice lors de l'évaluation de circuits naïfs. Les données mènent donc plutôt à penser que les experts réalisent quelque chose de plus que les novices, puisqu'ils mobilisent davantage certaines régions cérébrales (et que les novices ne le font pas), d'où l'hypothèse de la nécessité d'un effort cérébral particulier chez l'expert.

Une deuxième hypothèse alternative serait que les différences d'activation observées entre les experts et les novices pour la présentation de circuits naïfs ne sont pas dues à un effort cérébral particulier chez l'expert, mais au fait que le type de réponses fournies par les experts et les novices diffère (les experts affirment que les circuits naïfs sont incorrects, alors que les novices les jugent corrects) et que cela se répercute sur la différence d'activité cérébrale observée. Mais si les différences d'activation n'étaient dues qu'au type de réponse fournie par le participant, on aurait dû observer des différences de même nature lors de la présentation de circuits scientifiques où les réponses fournies par les novices et les experts diffèrent également (les novices affirment que les circuits scientifiques sont incorrects et les experts, qu'ils sont corrects). Or, ce n'est pas le cas. Les novices n'activent qu'une seule région significativement plus que les experts lorsqu'ils affirment que les circuits scientifiques sont incorrects, alors que les experts activent six régions cérébrales significativement plus que les novices lorsqu'ils évaluent que les circuits naïfs sont incorrects.

Une troisième hypothèse alternative pour expliquer les résultats obtenus serait que les experts activent toujours plus certaines régions que les novices lorsqu'ils évaluent une situation incorrecte, parce qu'ils « doutent » davantage que les novices ou parce qu'ils font plus « attention » à ne pas commettre d'erreurs. Par contre, si cette hypothèse alternative était fondée, on aurait dû observer une plus grande activité cérébrale chez l'expert lors de la présentation de circuits de contrôle où à la fois les novices et les experts affirment que les circuits sont incorrects. Mais, à l'exception du gyrus angulaire droit, les experts n'activent pas plus que les novices les régions que l'on retrouve pourtant significativement plus activées lors de la présentation de circuits naïfs.

4.2.2.3 Effort cérébral particulier chez l'expert et conceptions inappropriées

Après avoir examiné l'ensemble des hypothèses, celle qui semble la plus plausible pour expliquer pourquoi les experts activent davantage que les novices certaines régions de leur cerveau lors de l'évaluation de circuits naïfs est celle de la nécessité d'un effort cérébral particulier chez l'expert. La question qui se pose alors est : pourquoi les experts auraient-ils besoin de fournir un effort cérébral particulier? Nous pensons que c'est parce que les conceptions erronées qu'avaient sans doute les experts avant leur formation scientifique n'auraient peut-être pas complètement disparu de leur cerveau. En fait, les données de cette recherche laissent penser que le cerveau des experts posséderait peut-être toujours les réseaux neuronaux sous-tendant la conception inappropriée selon laquelle un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule.

4.2.3 Expertise scientifique en électricité et inhibition

4.2.3.1 Rôle des régions cérébrales plus activées chez l'expert lors de l'évaluation de circuits naïfs

Si les experts n'ont pas effacé de leur cerveau leur fausse conception, comment se fait-il qu'ils soient capables de répondre correctement aux questions posées? Pour répondre à cette question, il convient de discuter des fonctions cognitives associées aux régions cérébrales qui se retrouvent plus activées chez les experts que chez les novices. Cette discussion mène à formuler l'hypothèse selon laquelle l'activité supplémentaire observée chez les experts correspondrait peut-être à l'inhibition d'une conception naïve en électricité.

Deux des régions cérébrales plus activées chez les experts lors de l'évaluation de circuits naïfs se retrouvent dans la partie postérieure du cerveau. La première est le gyrus angulaire droit. Il s'agit d'une région se situant dans le lobe pariétal, à la jonction du lobe occipital et du lobe temporal. Comme nous l'avons expliqué à la section 4.2.1.1, cette région permet peut-être aux experts d'associer efficacement des informations visuospatiales liées aux circuits électriques observés et des informations « internes », sans doute situées dans le lobe temporal et peut-être liées aux connaissances antérieures. La deuxième région postérieure détectée est une activation bilatérale dans le gyrus lingual qui s'étend jusqu'au cortex occipito-temporal. Cette région est généralement associée à la reconnaissance d'objets (Tarkiainen, Cornelissen et Salmelin, 2002). Elle sert donc peut-être à l'identification des éléments composant les circuits électriques, c'est-à-dire l'identification des formes représentant les ampoules, les fils et la pile. L'activation bilatérale du gyrus lingual et l'activation du gyrus angulaire droit semblent indiquer un plus grand effort dans le traitement des informations visuelles et spatiales présentes dans l'image.

En plus des régions postérieures, quatre régions du lobe frontal s'avèrent davantage activées chez l'expert que chez le novice. Ce sont le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (BA 9), le cortex préfrontal ventrolatéral gauche (BA 45), le cortex frontal médial gauche (BA 6) et le CCA droit (BA 32). Comme nous l'avons relevé à la section 2.3.2, cet ensemble de régions cérébrales a été identifié comme étant fortement lié à l'inhibition. En fait, ce patron d'activation se retrouve dans la plupart des recherches impliquant de l'inhibition (Bush *et al.*, 1998; Houdé *et al.*, 2000, 2001; Menon, Adleman, White, Glover et Reiss, 2001; Nathaniel-James, Fletcher et Frith, 1997; Stavy et Babai, 2010). En examinant le rôle de chacune de ces régions, le rôle de ce patron d'activation dans l'inhibition devient plus clair.

Le CCA est associé à la détection de conflits dans le traitement de l'information. Lorsque des informations incompatibles circulent dans le cerveau d'un individu, le CCA s'active (Botvinick, Braver, Barch, Cohen et Carter, 2001; Botvinick, Cohen et Carter, 2004). Selon Botvinick (2007), l'utilité d'avoir une région cérébrale capable de réagir aux conflits dans le traitement de l'information du cerveau est d'envoyer un signal au cortex préfrontal indiquant la nécessité d'un meilleur contrôle cognitif. Ce signal permettrait, toujours selon Botvinick, d'activer les régions préfrontales nécessaires à l'évaluation d'une situation et à la prise de décisions. Pour une discussion plus approfondie du rôle du CCA, voir la section 2.2.1.

Les cortex préfrontaux dorsolatéral et ventrolatéral sont quant à eux des régions associées à la mémoire de travail. Plus précisément, le cortex préfrontal ventrolatéral est une région qui joue un rôle dans la récupération et le maintien d'informations dans la mémoire de travail, c'est-à-dire dans le cortex dorsolatéral, qui, pour sa part, constitue un espace cérébral permettant à des informations provenant de différentes régions du cerveau d'interagir (Blumenfeld et Ranganath, 2006; Curtis et D'Esposito, 2003; Rowe *et al.*, 2000). Le cortex dorsolatéral est ainsi le lieu cérébral

désigné pour comparer et analyser différentes réponses possibles et prendre une décision quant à la réponse à fournir. Lorsque plusieurs réponses entrent en compétition, le cortex préfrontal dorsolatéral joue habituellement un rôle important.

Le cortex frontal médial quant à lui est une région dont le rôle est moins bien connu. Isoda et Hikosaka (2007) l'associent au passage d'une action automatisée à une action contrôlée, alors que Chen, Muggleton, Tzeng, Hung et Juan l'associent plus précisément au contrôle et à l'inhibition de réponses spontanées (« prepotent responses »).

Ces quatre régions du lobe frontal accomplissent toutes les fonctions nécessaires aux experts pour inhiber l'influence de leurs conceptions erronées toujours présentes dans leur cerveau et arriver, à l'aide d'un contrôle cognitif soutenu, à répondre de façon scientifique. En effet, à cause de leur formation, les experts activent leur CCA lors de la présentation de circuits naïfs, puisqu'ils sont capables de détecter qu'il y a quelque chose de particulier dans cette situation qui mérite leur attention. Selon le modèle de Botvinik (2007), le CCA enverrait un signal au cortex préfrontal, peut-être par l'intermédiaire du cortex frontal médial, afin qu'il examine les différentes réponses possibles et élimine la réponse inappropriée associée à la conception erronée. Le résultat global de l'activation concertée de ces régions serait l'inhibition de l'émergence spontanée d'une réponse inappropriée au profit d'une réponse plus valable d'un point de vue scientifique.

4.2.3.2 Interprétation des différences d'activité cérébrale entre les circuits naïfs et scientifiques

La figure 4.2 montre que, pour les experts, les circuits naïfs ne mobilisent pas davantage que les circuits scientifiques les régions cérébrales associées à l'inhibition. Ce résultat mène à penser que les experts doivent inhiber leur fausse conception

autant lors de l'évaluation de circuits scientifiques que lors de l'évaluation de circuits naïfs. Si nous observons des activations plus grandes dans des régions associées à l'inhibition chez les experts (comparativement aux novices) lors de l'évaluation de circuits naïfs seulement (voir figure 4.1), c'est probablement parce que, contrairement aux experts, les novices n'ont pas recours à ces régions cérébrales dans cette condition, mais uniquement lors de l'évaluation de circuits scientifiques. Le contraste *Circuits scientifiques > circuits naïfs* appuie d'ailleurs cette idée, puisqu'on y voit que les novices activent davantage leur cortex préfrontal dorsolatéral et leur CCA, deux des régions les plus souvent rapportées dans les recherches sur l'inhibition (voir section 2.3.2). Notons cependant que le CCA est significativement activé à un seuil de $p < 0,005$ (non corrigé, minimum 5 voxels) et non à un seuil de $p < 0,001$ (non corrigé, minimum 10 voxels).

Les novices pourraient avoir davantage recours au cortex préfrontal dorsolatéral et au CCA lors de l'évaluation des circuits scientifiques, non pas pour inhiber, mais pour détecter les erreurs, analyser les circuits électriques et sélectionner une réponse. En effet, comme nous l'avons remarqué à la section 4.2.1.1, l'évaluation des circuits électriques semble demander plus d'attention et de mémoire de travail aux novices (ce qui active leur cortex préfrontal). De plus, puisque les novices affirment que les circuits scientifiques sont incorrects, ils mobilisent sûrement les mécanismes liés à la détection d'erreurs (ce qui active leur CCA). Ainsi, le CCA et le cortex préfrontal seraient activés chez les experts pour inhiber leur conception erronée, alors que les mêmes régions seraient activées chez le novices, mais pour des raisons différentes.

4.2.3.3 Persistance des conceptions inappropriées, inhibition et réseaux de neurones

Somme toute, les données recueillies dans cette recherche laissent entendre que les experts en sciences auraient peut-être déjà eu un réseau de neurones associé à

la conception erronée selon laquelle un fil est suffisant pour allumer une ampoule. La construction de ce réseau neuronal commun découlerait peut-être de l'expérience quotidienne de voir qu'un seul fil (qui en contient en fait deux mais dont le recouvrement laisse penser qu'il n'en contient qu'un seul) branché dans une prise électrique permet d'allumer une ampoule, ou d'un mécanisme plus général construit également à partir d'expériences du quotidien voulant que si deux items (A et B) sont liés par un troisième (C), l'item A agira sur l'item B.

Ce mécanisme hypothétique d'élaboration et de renforcement des réseaux neuronaux associés à une conception erronée peut être analysé à partir du modèle de Hebb (1949) et de la théorie de la potentiation à long terme (Bliss et Lomo, 1973). Selon ce modèle, qui est toujours considéré comme un modèle de référence en neurosciences, les neurones qui s'activent ensemble se connectent progressivement ensemble. Autrement dit :

Quand l'axone d'un neurone A est assez près pour exciter le neurone B et que, de façon répétée et persistante, le neurone A s'active en même temps que le neurone B, alors des processus de croissance ou de changement métabolique prennent place dans un ou plusieurs neurones, de telles sortes que l'efficacité du neurone A à activer le neurone B augmente. (Hebb, 1949, p. 62)²⁵

Ainsi, on peut penser que notre contact quotidien avec les appareils et les fils électriques ait possiblement mené au développement et au renforcement d'un réseau de neurones fortement interconnectés qui associe le branchement d'un (seul) fil avec le fonctionnement d'appareils électriques. Ce développement serait peut-être à l'origine de la croyance erronée selon laquelle un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule.

²⁵ « When an axon of cell A is near enough to excite cell B and repeatedly or persistently takes part in firing it, some growth process or metabolic change takes place in one or both cells such that A's efficiency, as one of the cells firing B, is increased »

Au cours de la formation scientifique, il est possible qu'un second réseau de neurones, lié au concept scientifique appris, soit progressivement développé. Des liens peuvent probablement être établis avec les réseaux antérieurs (qui mènent à des réponses erronées), mais ces derniers ne semblent pas s'effacer (peut-être parce que ces réseaux demeurent sollicités dans la vie quotidienne). Ainsi, à la suite d'une formation scientifique poussée, l'expert se retrouve peut-être avec deux réseaux de neurones qui entrent en compétition. Comme le réseau associé à des réponses inappropriées est sans doute fortement établi dans le cerveau (à cause d'activations répétées comme l'explique le modèle de Hebb), il s'active très facilement. Grâce à sa formation scientifique, l'expert en sciences semble cependant capable de percevoir, consciemment ou inconsciemment, qu'une situation impliquant une conception erronée mérite une attention particulière. À l'aide de la médiation des différentes régions cérébrales du lobe frontal, l'expert semble ensuite arriver à inhiber l'activation spontanée du réseau de neurones menant à des réponses inappropriées, ce qui lui permet ensuite de répondre correctement à la question. Ce processus est représenté de façon simplifiée dans la figure 4.3.

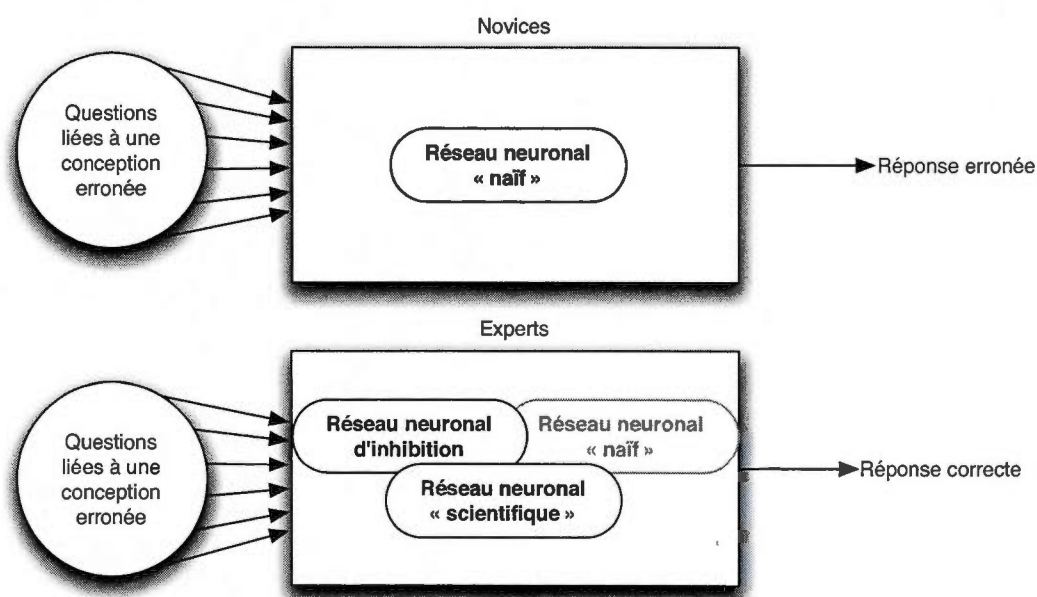


Figure 4.3 Comparaison des réseaux neuronaux des experts et des novices.

Si les réseaux de neurones associés à de fausses conceptions ne disparaissent jamais complètement du cerveau, ces dernières devraient ressurgir en cas de perte de la capacité d'inhibition. Des données issues de la neuropsychologie appuient cette hypothèse. Par exemple, Lombrozo, Kelement et Zaitchik (2007) ont montré que les patients atteints de la maladie d'Alzheimer développent une préférence envers les explications téléologiques, ce qui est habituellement courant seulement chez les enfants. Dans une autre étude, Zaitchik et Solomon (2008) ont mis en évidence un phénomène similaire : les personnes âgées et les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer régressent progressivement vers une pensée animiste. Ces deux études montrent que la préférence envers les explications téléologiques et animistes que les adultes apprennent à inhiber semble de retour dès lors que les capacités cognitives sont atténuées.

4.3 Conséquences sur l'apprentissage et l'enseignement des sciences

Dans cette troisième et dernière section, les conséquences des résultats obtenus sur l'apprentissage (quels sont les modèles de changement conceptuel compatibles avec les données obtenues?) et sur l'enseignement des sciences (comment faut-il enseigner les sciences?) sont mises en évidence.

4.3.1 Changement conceptuel et élimination des conceptions inappropriées

L'un des modèles de changement conceptuel le plus connu et le plus cité est le modèle proposé par Posner *et al.* (1982). Selon ce dernier, le changement conceptuel ne mène pas à une simple modification des conceptions erronées : il mène à leur remplacement par des conceptions plus conformes au savoir scientifique. Notre interprétation des données neurologiques obtenues dans le cadre de la présente étude s'accorde mal avec l'idée selon laquelle les conceptions des élèves sont rejetées et remplacées par de nouvelles lors d'un changement conceptuel. S'il y avait une simple substitution d'une conception pour une autre, les experts ne montreraient pas une activité cérébrale plus importante que les novices dans des régions associées à l'inhibition.

Une autre façon de définir le changement conceptuel est de considérer que ce ne sont pas simplement les conceptions qui changent au cours d'un changement conceptuel, mais l'ensemble de la structure conceptuelle qui est reconfigurée de façon importante (Duit et Treagust, 2003). Les liens entre les concepts sont modifiés, de même que leur définition, si bien que l'ancienne structure conceptuelle est remplacée par une nouvelle. Encore une fois, notre interprétation des données obtenues s'accorde mal avec cette thèse. Si la structure conceptuelle était redéfinie suite au changement conceptuel, l'ancienne structure ne devrait plus exister; elle devrait avoir été remplacée par la nouvelle. Pourtant, les données de notre étude laissent entendre

que les réseaux neuronaux présents avant le changement conceptuel ne sont pas disparus du cerveau et doivent être inhibés pour arriver à réaliser un changement conceptuel.

Tout apprentissage implique un changement. Or, notre interprétation des résultats obtenus laissent entendre que les réseaux de neurones responsables des conceptions naïves des élèves n'ont pas disparu, ni été remplacés au cours d'un changement conceptuel : ils semblent toujours présents (puisque les experts semblent devoir les inhiber). Donc, il y a probablement quelque chose qui change dans le cerveau au cours d'un changement conceptuel, mais ce changement ne semble pas consister à élaguer les connexions neuronales antérieures, ni à les remplacer. Alors, qu'est-ce qui change dans le cerveau au cours d'un changement conceptuel?

4.3.2 Changement conceptuel et conservation des conceptions inappropriées

Les données obtenues dans le cadre de cette étude sont compatibles avec les modèles de changement conceptuel postulant que les conceptions naïves (ou les éléments qui les constituent ou les supportent) ne sont pas effacées ni remplacées suite à un changement conceptuel. Au moins deux types de modèles de changement conceptuel s'accordent avec cette idée. Ces deux types de modèles sont illustrés à la figure 4.4.

Le premier type (première rangée de la figure 4.4) est celui qui suppose une coexistence entre les conceptions naïves (représentées par des cercles et des lignes noires) et les connaissances scientifiques apprises (représentées par des triangles et des lignes grises). Selon ce point de vue soutenu par différents auteurs, dont Bélanger (2008) (qui, lui-même, s'appuie sur Larochelle et Désautels, 1992; Mortimer, 1995; Solomon, 1983, 1984), les connaissances scientifiques apprises en contexte scolaire sont développées de façon plus ou moins indépendante des connaissances antérieures

et il existe une cohabitation de conceptions inappropriées et de conceptions plus scientifiques. Les conceptions antérieures ne sont pas remplacées par les nouvelles conceptions; elles coexistent.

Au niveau neuronal, si un tel modèle s'avérait juste, cela pourrait signifier que le réseau neuronal lié à une conception erronée (R_1) ne disparaît pas du cerveau au cours de l'apprentissage et qu'un nouveau réseau de neurones (R_2) s'établit « à côté » du réseau R_1 . Comme le réseau R_1 existe toujours et qu'il peut éventuellement se réactiver, il est alors nécessaire d'inhiber ce réseau R_1 pour que le « réseau neuronal scientifique » R_2 puisse s'exprimer. Les deux réseaux R_1 et R_2 seraient constamment en compétition selon ce modèle. Placé dans un contexte de la vie quotidienne, il se pourrait que le réseau de neurones R_1 lié à une conception naïve s'active plus facilement que le réseau R_2 lié, quant à lui, à une conception scientifique. À l'inverse, il est possible que le réseau R_2 lié une conception scientifique s'active plus facilement en contexte scolaire que le réseau R_1 , mais qu'il y ait toujours une nécessité d'inhiber R_1 pour que R_2 puisse s'activer.

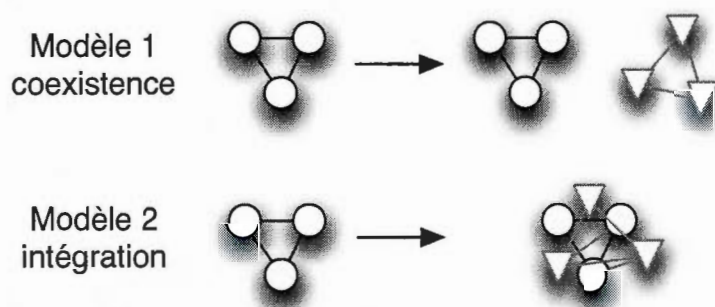


Figure 4.4 Deux types de modèles de changement conceptuel compatibles avec les données obtenues : la coexistence et l'intégration.

Le deuxième type de modèles (où la conception initiale est intégrée à la nouvelle conception, voir deuxième rangée de la figure 4.4) est celui où les conceptions naïves sont formées d'éléments relativement indépendants (représentés par des cercles et des lignes noires) qui s'activent de façon plus ou moins coordonnée pour fournir à l'individu les ressources nécessaires à la formulation d'une réponse. Ces éléments sont définis de différentes façons par différents auteurs. Le terme « *phenomological primitive* » est utilisé par diSessa (1993), alors que les termes « *intuitive rules* » et « *core intuitions* » sont utilisés respectivement par Stavy et Tirosh (2000) et Brown (1993). Suite à un changement conceptuel, le système de connaissance de l'individu a changé : les éléments initiaux sont toujours présents, mais de nouveaux éléments et de nouveaux liens ont été ajoutés (représentés par des triangles et des lignes grises).

Dans une représentation neuronale possible, une conception erronée pourrait prendre la forme d'un réseau de neurones (R_1) formé de sous-réseaux ($r_1, r_2, r_3 \dots$: les éléments constituant la conception). Au cours de l'apprentissage, le réseau R_1 et les sous-réseaux neuronaux ($r_1, r_2, r_3 \dots$) seraient conservés et intégrés en totalité ou en partie dans un réseau R_2 qui contiendrait au moins quelques-uns des sous-réseaux d'origine ($r_1, r_2, r_3 \dots$). Au cours du changement conceptuel, le réseau de neurones (R_1) et les sous-réseaux ($r_1, r_2, r_3 \dots$) le composant demeurent peut-être essentiellement inchangés et peuvent donc s'activer à n'importe quel moment, d'où la nécessité de les inhiber.

Si les données recueillies dans le cadre de notre recherche permettent d'apporter de l'information sur la nature du changement conceptuel, elles permettent cependant difficilement de prendre position en faveur du modèle de la coexistence ou du modèle de l'intégration. Si le modèle de la coexistence représentait bien ce qui se passe dans le cerveau et donc que le réseau neuronal « naïf » R_1 se situait à un endroit

différent du réseau « scientifique » R_2 , on pourrait, en théorie du moins, imaginer une situation particulière où, à certains moments, R_1 est activé sans que R_2 le soit, et vice versa.

Une des difficultés à surmonter si nous voulons savoir si les réseaux R_1 et R_2 sont distincts serait de concevoir une tâche où des experts en sciences répondraient parfois en utilisant R_1 et d'autres fois R_2 . Autrement dit, il faudrait que les réponses fournies par les experts soient parfois scientifiquement correctes (et donc basées sur R_2) et d'autres fois scientifiquement incorrectes (et donc basées sur R_1). Il faudrait donc que les experts en sciences oscillent entre une explication valable scientifiquement et une explication intuitive et incorrecte. Cela pourrait s'avérer méthodologiquement difficile, mais on obtiendrait ainsi deux conditions (réponses naïves et réponses scientifiques) qu'il serait peut-être possible de comparer.

Au tableau 4.4 et à la figure 4.2 du chapitre précédent, nous avons présenté les résultats comparant l'activité cérébrale des experts lorsqu'ils évaluent des circuits naïfs par rapport à lorsqu'ils évaluent des circuits scientifiques. On observe qu'aucune région cérébrale n'est significativement plus activée lors de l'évaluation de circuits scientifiques que lors de l'évaluation de circuits naïfs. Par contre, on observe deux régions, le lobe pariétal supérieur gauche (BA 7) et le cortex occipito-temporal droit (BA 19), significativement plus activées lors de l'évaluation de circuits naïfs que lors de l'évaluation de circuits scientifiques. Cela ne veut pas nécessairement dire que les réseaux R_1 et R_2 sont distincts. En effet, comme les experts en sciences ont répondu correctement aux circuits naïfs (en disant qu'ils sont incorrects) et aux circuits scientifiques (en disant qu'ils sont corrects), ils ont dû avoir recours à leurs connaissances scientifiques, fondées sur le réseau R_2 , dans les deux situations. Les experts de notre étude ne semblent pas avoir activé le réseau R_1 (sans que le réseau R_2 ne soit activé, puisqu'ils ont toujours répondu de façon scientifique) et c'est pour

cette raison que notre étude ne permet pas de prendre position en faveur de l'un ou l'autre des modèles proposés. Il aurait fallu qu'à certains moments les experts se trompent en ne faisant reposer leur travail cérébral que sur R_1 , mais, même dans cette situation (qui est difficile méthodologiquement à mettre en place), il n'aurait pas été simple d'arriver à prendre position en faveur d'un modèle au détriment de l'autre.

En effet, même s'il était possible de concevoir une tâche où les experts hésitent entre une conception naïve et des connaissances scientifiques établies, il y aurait encore des difficultés à surmonter. Par exemple, il est possible que les réseaux R_1 et R_2 soient bel et bien distincts, mais qu'ils soient si près l'un de l'autre, que la résolution spatiale des appareils d'imagerie cérébrale actuellement disponibles ne permettrait pas de distinguer les deux. Il y a également la possibilité que les réseaux R_1 et R_2 soient distincts, mais enchevêtrés (sans pourtant être interconnectés comme dans le modèle de l'intégration). Si tel était le cas, les techniques d'imagerie cérébrale ne permettraient pas de distinguer les deux réseaux. En résumé, ce n'est pas parce que le modèle de la coexistence existe dans le cerveau qu'il est facilement détectable et ce sera un défi de taille que d'essayer au cours des prochaines années d'exclure un des deux modèles présentés ici.

4.3.3 Changement conceptuel, développement de l'inhibition et enseignement des sciences

Tous les modèles de changement conceptuel compatibles avec les données obtenues, tant le modèle de l'intégration que celui de la coexistence, ont quelque chose en commun : l'inhibition.

L'inhibition est une aptitude cognitive qui fait l'objet de nombreuses discussions dans le domaine des neurosciences cognitives et en sciences cognitives en général (Bush *et al.*, 1998; Houdé *et al.*, 2000, 2001; Menon, Adelman, White,

Glover et Reiss, 2001; Nathaniel-James, Fletcher et Frith, 1997; Stavy et Babai, 2010). Certains chercheurs vont même jusqu'à faire du concept d'inhibition la pierre angulaire du développement de l'individu. Houdé résume cette idée en affirmant qu'« apprendre, c'est apprendre à inhiber ». Pour ce chercheur, si l'individu se développe et apprend, ce n'est pas tant parce qu'il construit de nouvelles habiletés, mais plutôt parce qu'il arrive à inhiber les mouvements, les connaissances ou les stratégies qui sont inappropriés (Houdé, 2000, 2004).

Bien que le concept soit jugé fondamental dans plusieurs domaines s'intéressant à l'apprentissage et au développement, le concept d'inhibition est rarement utilisé dans les recherches actuelles en éducation. Le constructivisme piagétien est par contre omniprésent. Les connaissances (comme les habiletés et les compétences) sont perçues comme des constructions. À partir des connaissances antérieures, on construit de nouvelles connaissances qui viennent les remplacer. On ne perçoit que rarement l'apprentissage comme étant la désactivation ou l'inhibition (et non l'effacement ou le remplacement) d'une connaissance inappropriée.

L'idée que l'inhibition joue un rôle important dans l'apprentissage, notamment dans l'apprentissage de l'électricité, présente un potentiel éducatif important. En effet, si l'inhibition joue un rôle dans l'apprentissage, il devient alors intéressant de savoir *comment* favoriser l'inhibition chez les élèves et dans quels contextes. On peut imaginer l'émergence dans les prochaines années de ce que l'on pourrait appeler une pédagogie de l'inhibition. Les questions centrales de ce programme de recherche viseraient à cerner les contenus d'apprentissage pour lesquels l'inhibition joue un rôle important et à vérifier si le développement général de la capacité d'inhibition a des conséquences sur l'inhibition de contenu particulier. Également, il deviendrait essentiel d'évaluer les conditions permettant d'optimiser le

développement de l'inhibition et d'étudier les contextes où elle est effectivement appropriée.

Les réponses à ces questions sont susceptibles de modifier considérablement nos pratiques enseignantes. Déjà, des pistes peuvent être entrevues en regardant les recherches réalisées dans des domaines connexes. Dans le deuxième chapitre portant sur le cadre théorique, la recherche de Houdé et de ses collaborateurs portant sur l'enseignement du raisonnement logique par inhibition (ou enseignement logicoémotionnel) a été présentée (Houdé *et al.*, 2000, 2001). Les résultats de cette recherche donnent un aperçu des possibilités : un enseignement formel de la logique ne donne presque aucun gain de performance chez les participants de l'étude, alors qu'un enseignement par inhibition montre des améliorations considérables. Cette démarche d'enseignement consistant à formuler des avertissements émotifs et à apprendre à identifier les réponses pièges serait facilement exportable dans un domaine comme celui de l'apprentissage de l'électricité.

De plus, si l'apprentissage des sciences repose davantage sur la capacité d'inhiber des conceptions inappropriées que sur l'éradication des conceptions antérieures des élèves, le développement de l'inhibition, c'est-à-dire de la capacité de contrôler ses croyances fondamentales et d'appliquer une attitude constante de doute par rapport aux réponses que l'on fournit, pourrait s'avérer central dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences. On pourrait également penser que des allers-retours constants entre les conceptions erronées des élèves et les théories scientifiques à apprendre - par exemple, en comparant systématiquement les conceptions erronées avec les théories scientifiques - sont essentiels pour réaliser un changement conceptuel.

Le concept d'inhibition semble si central à l'apprentissage, et pourtant si absent de la littérature en éducation, qu'on ne peut qu'espérer qu'au cours des prochaines années des recherches portant spécifiquement sur le rôle de l'inhibition dans les apprentissages scolaires voient le jour.

CONCLUSION

Tel que mentionné au premier chapitre portant sur la problématique, la persistance des conceptions inappropriées des élèves est un problème éducatif connu, documenté, mais les processus responsables du changement de conception sont encore mal compris (diSessa, 2006). À l'aide de l'IRMf, cette recherche avait pour objectif de fournir de nouvelles informations sur les processus de changement conceptuel en identifiant les mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en électricité. Pour ce faire, des experts et des novices en sciences ont répondu à des questions portant sur des circuits électriques à l'intérieur d'un appareil d'IRMf, ce qui a permis de déterminer quelles étaient les régions cérébrales s'avérant plus activées chez les experts et chez les novices.

Les résultats montrent que les experts en sciences activent en moyenne plus fortement que les novices certaines régions de leur cerveau lorsqu'on leur présente des circuits électriques naïfs où une ampoule liée à une pile par un seul fil s'allume. Ces régions sont le CCA droit, le cortex préfrontal dorsolatéral gauche, le cortex préfrontal ventrolatéral gauche, le cortex frontal médial gauche, le gyrus angulaire droit, ainsi que le cortex occipito-temporal gauche et droit. À l'exception du gyrus angulaire droit et du cortex occipito-temporal, qui sont sans doute liés à un traitement visuospatial plus soutenu chez les experts que chez les novices, les régions plus activées chez les experts sont des régions que l'on retrouve habituellement activées dans les études où l'on demande aux participants d'inhiber une réponse ou une stratégie qu'ils ont tendance à utiliser spontanément (Bush *et al.*, 1998; Houdé *et al.*, 2000, 2001; Menon, Adleman, White, Glover et Reiss, 2001; Nathaniel-James, Fletcher et Frith, 1997; Stavy et Babai, 2010).

La conclusion centrale découlant des résultats de cette étude est que l'inhibition semble jouer un rôle important dans l'expertise scientifique en électricité. Plus précisément, notre interprétation des résultats obtenus appuie l'idée selon laquelle les experts possèderaient toujours dans leur cerveau la trace d'une conception inappropriée (« un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule ») et que, suite à leur formation scientifique, ils auraient développé une conception plus conforme aux savoirs scientifiques, mais n'auraient pas effacé de leur cerveau leur conception initiale qu'ils doivent alors inhiber. Pour apprendre les concepts scientifiques liés à l'électricité, il ne faudrait peut-être donc pas simplement apprendre de nouvelles connaissances, mais également apprendre dans certains cas à inhiber ses connaissances antérieures inappropriées.

Cette recherche s'inscrit dans un programme de recherche plus vaste dont l'objectif est de développer un modèle neuroscientifique du changement conceptuel susceptible d'aider les enseignants à favoriser le changement conceptuel de leurs élèves. Les premiers éléments de ce modèle se retrouvent à la section 4.3.2. Pour poursuivre le développement de ce modèle et optimiser les retombées pédagogiques possibles, d'autres recherches seront nécessaires. Celles-ci pourraient s'inscrire autour de deux axes de développement : le premier visant une meilleure compréhension des mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage et l'expertise en sciences et le deuxième ayant pour but d'étudier l'impact de différentes méthodes d'enseignement des sciences sur le cerveau. Le premier axe permettrait de fixer la « cible cérébrale » à atteindre par l'enseignement des sciences et le second, d'évaluer les meilleurs moyens pédagogiques d'atteindre cet objectif.

Pour mieux comprendre les mécanismes cérébraux associés à l'expertise en sciences, dans un premier temps, il serait intéressant de reproduire les résultats obtenus par l'équipe de Dunbar dans leur étude pilote jamais publiée dans une revue

scientifique, lesquels résultats appuient l'idée que l'inhibition jouerait un rôle dans le changement conceptuel en mécanique (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Pettito et Dunbar, 2004). En complémentarité avec les études utilisant la neuroimagerie, des études comportementales sur les liens entre la capacité d'inhibition, telle que mesurée par des questionnaires neuropsychologiques, et les performances des élèves en sciences seraient souhaitables. À ce sujet, Kwon et Lawson (2000) ont déjà démontré que la capacité d'inhibition était la fonction exécutive montrant le plus de liens avec la capacité de raisonner scientifiquement et de s'améliorer à un test portant sur le concept de pression de l'air. Partant de cette recherche, il faudrait aller plus loin en examinant les liens entre l'inhibition des élèves et leurs résultats scolaires en sciences. Toujours afin de mieux caractériser l'activité cérébrale liée à l'expertise scientifique, il serait possible de comparer des étudiants ayant d'excellents résultats académiques en sciences avec des étudiants présentant des difficultés. On pourrait également refaire une expérimentation similaire à celle décrite dans cette thèse, mais en comparant cette fois un groupe de novices en sciences avec un groupe de « super experts » constitués de professeurs de physique chevronnés. De cette façon, il serait possible de savoir si l'inhibition joue un rôle temporaire dans l'expertise scientifique ou, plutôt, un rôle permanent.

Pour mieux comprendre les mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage des sciences, étudier les différences d'activités cérébrales de groupes d'étudiants à différents moments de leur formation scientifique (début du cégep, fin du cégep, fin du baccalauréat, fin de la maîtrise, etc.) serait également pertinent. Bien que ce soit plus difficile techniquement, il serait particulièrement intéressant de suivre des cohortes d'étudiants qui se destinent aux sciences dans une étude de type longitudinale. On pourrait par exemple faire passer un examen d'IRMf au début et à la fin de la formation collégiale à des étudiants en sciences naturelles, de même qu'un

troisième examen d'IRMf à la fin des études universitaires en sciences, pour ceux qui auront poursuivi ce parcours.

Pour étudier les effets de différents types d'interventions pédagogiques en sciences sur le cerveau, différentes études peuvent être envisagées. L'une des plus simples au niveau logistique consisterait à comparer l'activité cérébrale de participants avant et après une intervention qui aurait lieu pendant la séance d'IRMf. Cela comporterait l'avantage pour le participant de n'avoir à participer qu'à une seule séance d'IRMf. Il serait par exemple possible de créer des films expliquant les réponses à des questions scientifiques et de présenter ces films juste après une séquence d'IRMf pré-test. La présentation de ces films serait immédiatement suivie d'une deuxième séquence d'IRMf post-test. Finalement, il serait intéressant de comparer l'activité cérébrale de groupes ayant reçu des cours de sciences préconisant différentes approches (traditionnelle, par problème, par la découverte, etc.). Toutes ces recherches auraient pour but d'étudier les effets de différents types d'intervention sur le cerveau, mais, surtout, de comparer les patrons d'activation de chacun des types d'intervention avec un patron d'activité typique de l'expertise en sciences. Cette approche permettrait sans doute d'identifier les approches pédagogiques les plus susceptibles de favoriser le changement conceptuel chez les élèves.

* * *

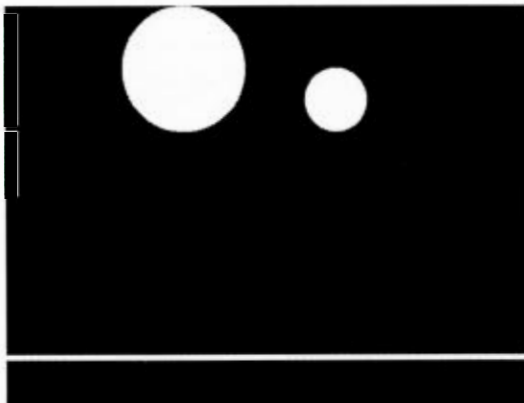
La neuroéducation a progressé de façon exponentielle au cours des dix dernières années, poussée par le développement de techniques d'imagerie cérébrale comme l'IRMf. De nos jours, on comprend mieux que jamais ce qui se passe dans le cerveau d'un élève qui apprend à lire ou à compter; on connaît de mieux en mieux les effets de différents types d'enseignement de la lecture et des mathématiques sur le cerveau; on sait de mieux en mieux comment et pourquoi le cerveau des

dyslexiques se transforme suite à une intervention pédagogique efficace pour compenser une anomalie cérébrale. Les mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage et l'enseignement des sciences sont cependant beaucoup moins connus. Au cours des prochaines années, l'approche neuroscientifique de l'apprentissage des sciences (la neurodidactique des sciences) connaîtra probablement un essor important en profitant de l'expérience développée dans les autres domaines de la neuroéducation. Nous comprendrons certainement beaucoup mieux que maintenant les mécanismes cérébraux permettant à un élève d'apprendre les sciences. D'ici là, l'hypothèse selon laquelle l'inhibition jouerait un rôle important dans l'apprentissage des sciences apparaît la plus plausible.

APPENDICE A - QUESTIONNAIRE UTILISÉ LORS DE LA SÉLECTION DES PARTICIPANTS

Question 1

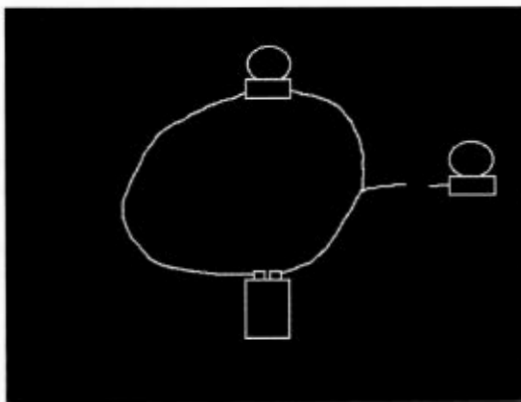
Les deux balles présentées sur l'image ci-dessous sont constituées de plomb. Si on pouvait tenir les deux balles dans nos mains, nous pourrions sentir que les deux balles sont lourdes, mais que la plus grande des deux balles est sensiblement plus lourde. Si on laisse tomber ces deux balles (en même temps et de la même hauteur) sur le plancher de la bibliothèque, qu'observera-t-on selon vous?



- A. Les balles ne tomberont pas; elles flotteront dans l'air.
- B. La balle la plus petite tombera plus vite.
- C. La balle la plus grande tombera plus vite.
- D. Les deux balles tomberont sensiblement à la même vitesse.

Question 2

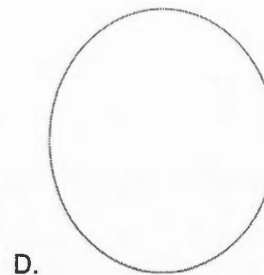
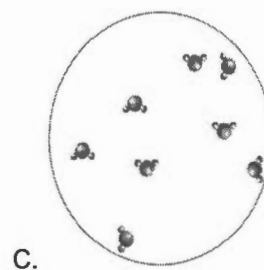
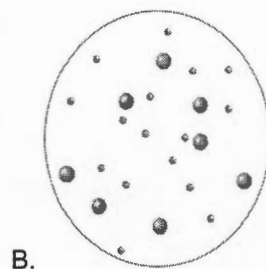
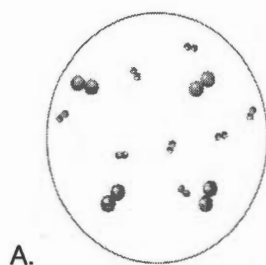
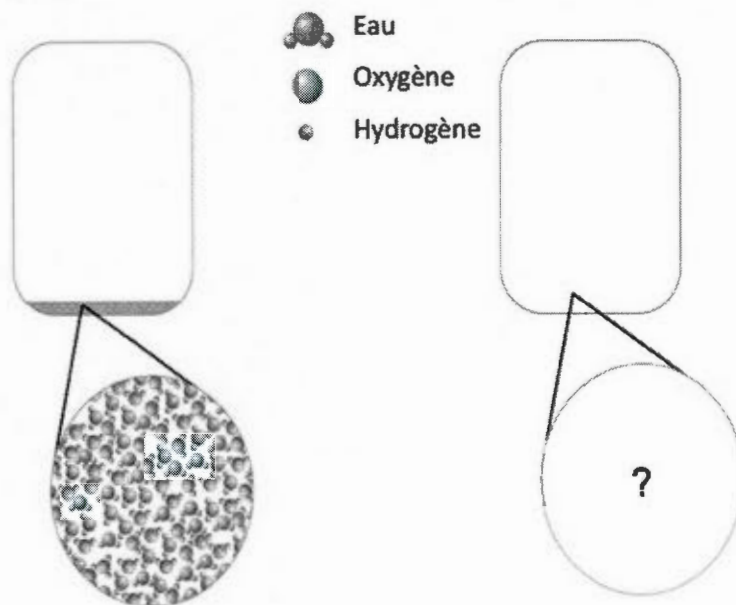
L'image ci-dessous présente un circuit électrique qui comprend : une pile (en bas du schéma), deux ampoules (en haut et à droite du schéma) et des fils (lignes du schéma). Si la pile est fonctionnelle de même que les deux ampoules, que devrait-il arriver?



- A. Les deux ampoules devraient s'allumer.
- B. Seule l'ampoule du haut devrait s'allumer.
- C. Seule l'ampoule de droite devrait s'allumer.
- D. Aucune des deux ampoules ne devraient s'allumer.

Question 3

Si nous chauffons, jusqu'à évaporation complète, une petite quantité d'eau (en gris sur l'image à gauche) dans un contenant fermé, à quoi ressembleront les molécules d'eau après l'évaporation?



Question 4

Selon vous, quel est le but principal d'un scientifique?

- A. Décrire la nature à l'aide d'équations mathématiques.
- B. Imaginer de nouvelles théories.
- C. Démontrer que les théories existantes sont fausses.
- D. Utiliser la science pour trouver des solutions aux problèmes de la société.

Question 5

L'image 1 ci-dessous présente, vue d'en haut, une balle qui roule au sol juste avant qu'on lui donne un coup dans la direction donnée par la flèche. Laquelle des trajectoires présentées à l'image 2 (A, B, C ou D) décrit le mieux le trajet que suivra la balle après le coup?

Image 1

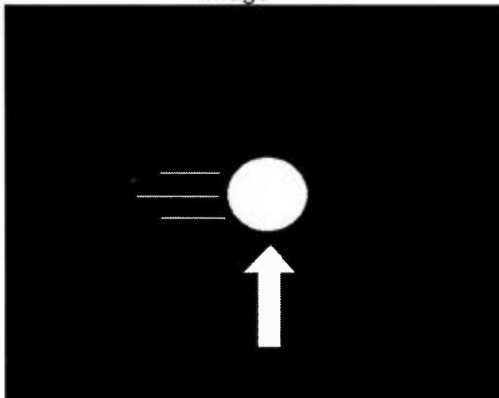
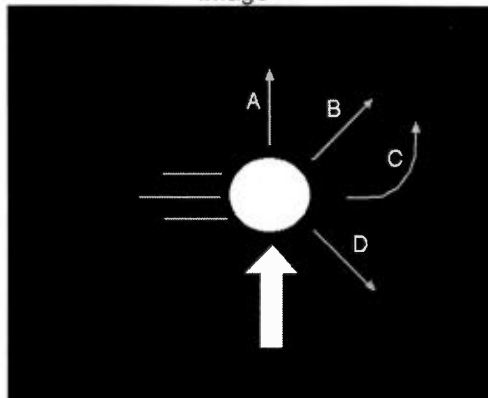
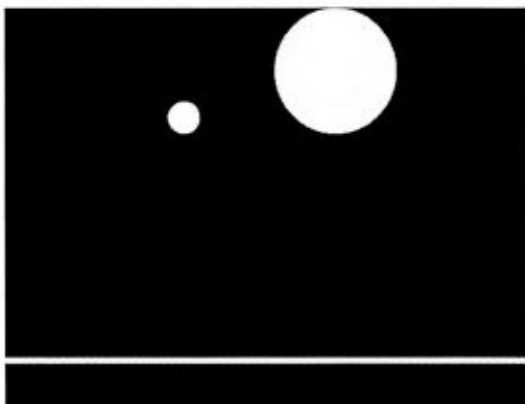


Image 2



Question 6

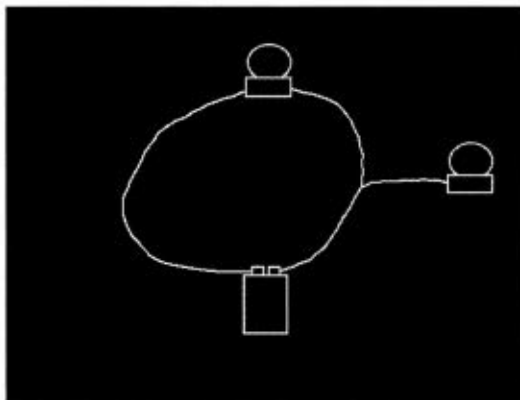
Les deux balles présentées sur l'image ci-dessous sont constituées de plomb. Si on pouvait tenir les deux balles dans nos mains, nous pourrions sentir que les deux balles sont lourdes, mais que la plus grande des deux balles est sensiblement plus lourde. Si on laisse tomber ces deux balles (en même temps et de la même hauteur) sur le plancher de la bibliothèque, qu'observera-t-on selon vous?



- A. La balle la plus petite tombera plus vite.
- B. Les balles ne tomberont pas; elles flotteront dans l'air.
- C. La balle la plus grande tombera plus vite.
- D. Les deux balles tomberont sensiblement à la même vitesse.

Question 7

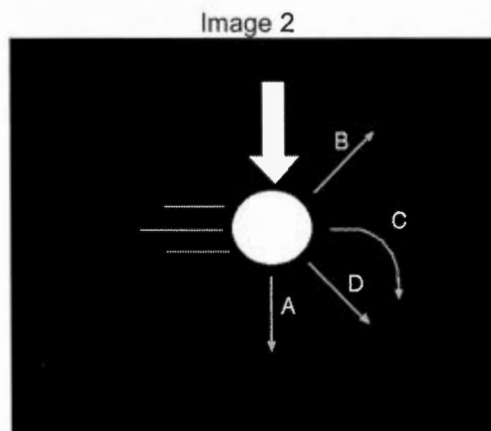
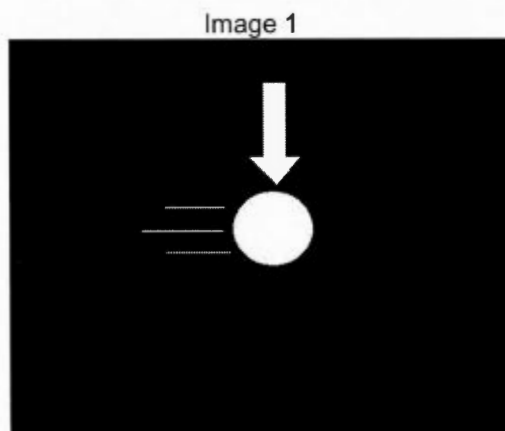
L'image ci-dessous présente un circuit électrique qui comprend : une pile (en bas du schéma), deux ampoules (en haut à gauche et au dessus de la pile) et des fils (lignes du schéma). Si la pile est fonctionnelle de même que les deux ampoules, que devrait-il arriver?



- A. Les deux ampoules devraient s'allumer.
- B. Seule l'ampoule à droite devrait s'allumer.
- C. Seule l'ampoule en haut devrait s'allumer.
- D. Aucune des deux ampoules ne devraient s'allumer.

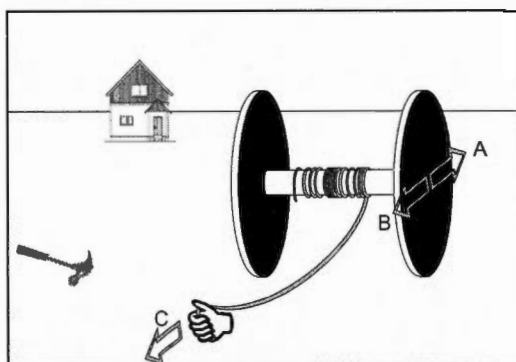
Question 8

L'image 1 ci-dessous présente, vue d'en haut, une balle qui roule au sol juste avant qu'on lui donne un coup dans la direction donnée par la flèche. Laquelle des trajectoires présentées à l'image 2 (A, B, C ou D) décrit le mieux le trajet que suivra la balle après le coup?



Question 9

Dans un chantier de construction, on trouve un gros rouleau de bois abandonné (un de ces rouleaux qui servent habituellement à enrouler un tuyau de plastique). Le rouleau est posé sur le sol et n'est relié à aucune autre pièce. Si on enroule une corde autour, comme dans le schéma suivant, et qu'on tire dessus doucement dans la direction « C », comment le rouleau va-t-il se comporter?



- A. Le rouleau se déplacera dans la direction A.
- B. Le rouleau restera immobile.
- C. Le rouleau se déplacera dans la direction C.
- D. Le rouleau tournera sur place.

APPENDICE B – FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

R egroupement N euroimagerie / Q uébec Comité mixte d'éthique de la recherche – RNQ

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

TITRE DU PROJET DE RECHERCHE

Étude des mécanismes cérébraux sous-tendant les processus de changement conceptuel en physique

RESPONSABLE DU PROJET DE RECHERCHE

Responsable du projet :

Patrice Potvin, Université du Québec à Montréal, 514-987-3000, poste 1290

Collaborateurs :

Kevin N. Dunbar, University of Toronto Scarborough

Martin Riopel, Université du Québec à Montréal

Jonathan Fugelsang, University of Waterloo

Steve Masson, Université du Québec à Montréal

ORGANISME SUBVENTIONNAIRE

Fonds québécois de recherche sur la société et la culture (FQRSC)

PRÉAMBULE

Nous vous demandons de participer à un projet de recherche en neuroimagerie. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Le présent formulaire de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur et aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

QU'EST-CE QU'UNE RÉSONANCE MAGNÉTIQUE?

L'examen par résonance magnétique est une technique médicale qui donne des images de grande qualité du corps, du cerveau ainsi que de leur fonctionnement. Cette technique fait appel à une force naturelle présente autour de nous: le magnétisme. Ce champ magnétique intense est créé par un aimant.

La résonance magnétique permet également des examens par résonance magnétique fonctionnelle. Dans ce cas, l'appareil permet de voir les zones du cerveau qui deviennent actives lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche précise. Cette tâche peut être motrice, par exemple, lorsque l'on demande à la personne de bouger un doigt ou bien elle peut être cognitive, par exemple lorsque l'on demande à la personne d'effectuer un calcul mental, lire un mot ou encore regarder des photographies. Lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche, il y a augmentation de l'arrivée de sang dans la partie du cerveau qui contrôle cette activité. L'arrivée du sang provoque un changement dans le signal émis par le cerveau et cette modification de signal peut être détectée par l'appareil de résonance magnétique.

Pour l'examen d'imagerie par résonance magnétique, vous serez allongé sur un matelas qui sera lentement glissé dans un grand tube. Le tube est ouvert aux deux extrémités, il est muni d'une excellente aération et très bien éclairé. Un système d'interphone vous permettra de communiquer avec le technicien au besoin. Pour votre confort, on vous demandera de porter soit un casque d'écoute, soit des bouchons protecteurs qui seront installés dans vos oreilles, et ce, afin de diminuer les bruits importants qui sont émis par l'appareil. Pendant que l'appareil fonctionne, il est important que vous demeuriez immobile. Pour ce faire, un coussinet sera placé autour de votre tête afin d'assurer votre immobilité. Aucune substance ne vous sera injectée.

PRÉSENTATION DU PROJET DE RECHERCHE ET DE SES OBJECTIFS

Vous êtes invité à participer à un projet de recherche en neuroimagerie qui vise à identifier et à comprendre les mécanismes cérébraux qui sous-tendent l'apprentissage de concepts scientifiques particulièrement difficiles à acquérir.

Plus précisément, cette recherche vise à mieux comprendre les mécanismes cérébraux sous-tendant les processus de changement conceptuel en physique et en électricité en analysant l'activité cérébrale d'étudiants réalisant une tâche cognitive impliquant des circuits électriques et des balles en mouvement.

Trente étudiants seront recrutés pour participer à cette étude.

NATURE ET DURÉE DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Ce projet de recherche se déroulera à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.

Votre participation à ce projet de recherche consistera à passer un examen d'imagerie par résonance magnétique tel que décrit précédemment. Pour cet examen nous vous demanderons d'effectuer certaines tâches qui nous permettront de capter les images de votre cerveau pendant que vous effectuerez ces tâches. La durée de ces tâches sera d'environ 60 minutes. La durée totale de votre participation à ce projet de recherche sera d'environ 2 heures, ce qui inclut les étapes préparatoires à l'examen d'imagerie par résonance magnétique.

▪ Description des tâches

Votre tâche cognitive consistera à déterminer, en appuyant sur l'un ou l'autre des boutons, si les films présentés sont en accord ou en désaccord avec ce à quoi vous vous attendez. Les films portent sur des balles en mouvement et des circuits électriques.

AVANTAGES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Il n'y a aucun avantage direct pouvant découler de votre participation au projet de recherche. Cependant, l'information recueillie permettra une meilleure compréhension de l'apprentissage en sciences.

INCONVÉNIENTS POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Les conditions imposées par l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique peuvent entraîner un certain inconfort du fait de devoir rester immobile pendant l'examen et un inconfort pourrait également être associé au bruit que génère le fonctionnement de l'appareil. Vous pourriez aussi ressentir un certain stress ou une sensation de claustrophobie.

RISQUES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Selon les connaissances actuelles, votre participation à un examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ne vous fera courir, sur le plan médical, aucun risque si vous ne présentez aucune contre-indication.

Par ailleurs, à cause de la puissance de ce champ magnétique émis par l'appareil, il est nécessaire de prendre certaines précautions. C'est pourquoi vous devez obligatoirement remplir un questionnaire détaillé afin de détecter toute contre-indication à la passation de cet examen tels que, par exemple, la présence d'un stimulateur cardiaque, d'un clip d'anévrisme, de prothèse métallique, de prothèse ou clip valvulaire cardiaque, de présence de métal dans l'œil ou sur le corps, de tatouage, de piercing, de broches dentaires ou si vous souffrez de claustrophobie aiguë. Les femmes enceintes et celles qui allaitent ne devraient pas passer un examen d'imagerie par résonance magnétique (voir questionnaire en annexe).

La vérification rigoureuse de la présence de contre-indication sera assumée par le technologue en fonction à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle.

INDEMNISATION EN CAS DE PRÉJUDICE

Si, dans le cadre de votre participation à l'étude, vous deviez subir quelque préjudice que ce soit vous recevrez tous les soins médicaux nécessaires, sans frais de votre part.

En acceptant de participer à ce projet, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs, le commanditaire ou l'établissement de leur responsabilité civile et professionnelle.

COMPENSATION POUR VOTRE PARTICIPATION

Pour votre participation au projet de recherche, vous recevrez une image de votre cerveau.

INFORMATION CONCERNANT LE PROJET DE RECHERCHE

Nous répondrons à votre satisfaction à toute question que vous poserez à propos du projet de recherche auquel vous acceptez de participer.

REFUS OU RETRAIT DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Il est entendu que votre participation au projet de recherche est tout à fait volontaire, et que vous restez à tout moment libre de mettre fin à celle-ci sans avoir ni à motiver votre décision ni à subir de préjudice de quelque nature que ce soit.

ARRÊT DU PROJET DE RECHERCHE PAR LE CHERCHEUR

Le projet de recherche peut être interrompu par le chercheur pour différents motifs ou certaines circonstances, par exemple, des contre-indications d'ordre éthique ultérieures, l'établissement de nouveaux critères de sélection auxquels le sujet ne répondrait plus.

RETOUR D'INFORMATION ET AUTORISATION DE TRANSMETTRE LES RÉSULTATS

Les scans de recherche ne font pas l'objet d'un examen neuroradiologique. Cependant, l'examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle peut mettre en évidence des problèmes jusque-là ignorés. C'est pourquoi, en présence de toute particularité dans les scans, vous serez invité à passer un nouvel examen avec un appareil de 1.5 teslas pour vérification. Advenant, la confirmation d'une anomalie, un neurologue transmettra ces données à votre médecin traitant ou vous assurera un suivi.

J'autorise la personne responsable de ce projet de recherche à transmettre les résultats de mon évaluation à mon médecin traitant si l'examen révèle une condition nécessitant un suivi:

Oui ☐ Non ☐

Nom et adresse de mon médecin traitant:

CONFIDENTIALITÉ

Durant votre participation à ce projet de recherche, le chercheur responsable du projet ainsi que son personnel recueilleront et consigneront dans un dossier de recherche les renseignements vous concernant. Seuls les renseignements nécessaires à la bonne conduite du projet de recherche seront recueillis.

Ces renseignements comprennent les résultats de tous les tests que vous aurez à subir lors de ce projet de recherche. Votre dossier comprend aussi d'autres renseignements tels que votre nom, votre sexe, votre date de naissance, votre origine ethnique, de même que la moyenne scolaire obtenue lors de vos cours au niveau collégial et au niveau universitaire.

Tous ces renseignements recueillis au cours du projet de recherche demeureront strictement confidentiels dans les limites prévues par la loi. Afin de préserver votre identité et la confidentialité de ces renseignements, vous ne serez identifié que par un numéro de code. La clé du code reliant votre nom à votre dossier de recherche sera conservée par le chercheur responsable du projet de recherche dans un lieu sécuritaire.

Le chercheur responsable utilisera les données du projet de recherche à des fins de recherche dans le but de répondre aux objectifs scientifiques du projet de recherche décrits dans le formulaire d'information et de consentement. Vos renseignements personnels seront détruits cinq ans après la fin du projet de recherche.

Les données du projet de recherche pourront être publiées dans des revues médicales ou partagées avec d'autres personnes lors de discussions scientifiques. Aucune publication ou communication scientifique ne renfermera quoi que ce soit qui puisse permettre de vous identifier.

À des fins de surveillance et de contrôle, votre dossier de recherche pourront être consultés par une personne mandatée par le comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec, par une personne mandatée par le ministre de la Santé et des Services sociaux ou par des organismes gouvernementaux mandatés par la loi. Toutes ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de confidentialité.

À des fins de protection, notamment afin de pouvoir communiquer avec vous rapidement, vos noms et prénoms, vos coordonnées et la date de début et de fin de votre participation au projet seront conservés pendant un an après la fin du projet dans un répertoire maintenu par le chercheur responsable.

Vous avez le droit de consulter votre dossier de recherche pour vérifier l'exactitude des renseignements recueillis aussi longtemps que le chercheur responsable du projet de recherche, l'établissement ou l'institution de recherche détiennent ces informations. Cependant, afin de préserver l'intégrité scientifique du projet de recherche, vous n'aurez accès à certaines de ces informations qu'une fois l'étude terminée.

FINANCEMENT

Pour effectuer cette recherche, le chercheur responsable du projet a reçu une subvention du Fonds québécois de la recherche sur la société et la culture (FQRSC). Les sommes reçues couvrent les frais reliés à cette recherche.

ACCÈS AUX CHERCHEURS

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si vous croyez que vous éprouvez un problème de santé relié à votre participation au projet de recherche, vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable de l'étude, Patrice Potvin, au 514-987-3000, poste 1290.

PROCÉDURES EN CAS D'URGENCE MÉDICALE

Veuillez noter que l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal n'est pas un centre hospitalier de soins de courte durée qui offre des services d'urgence et qui compte sur la présence sur place d'un médecin 24 heures sur 24. Par conséquent, advenant une condition médicale qui nécessiterait des soins immédiats, les premiers soins vous seraient dispensés par le personnel en place et des dispositions seraient prises afin de vous transférer, si nécessaire, aux urgences d'un hôpital avoisinant.

EN CAS DE PLAINTE

Pour tout problème concernant les conditions dans lesquelles se déroule votre participation à ce projet, vous pouvez, après en avoir discuté avec la personne responsable du projet, faire part de vos préoccupations à la responsable des plaintes de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal à l'adresse suivante : Commissaire local aux plaintes et à la qualité des services, Institut universitaire de gériatrie de Montréal, 4565, chemin Queen-Mary, Montréal (Québec) H3W 1W5. Tél. : (514) 340-3517.

INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE ÉTHIQUE

Le comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec a approuvé ce projet de recherche et s'assure du respect des règles éthiques durant tout le déroulement de la recherche. Pour toute information, vous pouvez rejoindre le secrétariat du Comité au numéro : (514) 340-2800, poste 3250.

Ce projet a également reçu l'approbation du Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université du Québec à Montréal (CIÉR). Si vous désirez obtenir des informations sur les responsabilités des chercheurs au plan de l'éthique de la recherche ou formuler une plainte, vous pouvez exposer votre situation auprès du Président du CIÉR, Joseph Josy Lévy. Il peut être joint par courriel à levy.joseph_josy@uqam.ca ou au numéro 514-987-3000, poste 7753.

CONSENTEMENT DU PARTICIPANT

Je déclare avoir lu le présent formulaire de consentement, particulièrement quant à la nature de ma participation au projet de recherche et l'étendue des risques qui en découlent. Je reconnais qu'on m'a expliqué le projet, qu'on a répondu à toutes mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision.

Je consens librement et volontairement à participer à ce projet. On me remettra une copie signée du présent formulaire.

Nom du sujet

Signature du sujet

DÉCLARATION DU CHERCHEUR

Je, soussigné(e) _____, certifie :

Avoir expliqué au signataire intéressé les termes du présent formulaire, avoir répondu aux questions qu'il m'a posées à cet égard, avoir clairement indiqué qu'il reste à tout moment libre de mettre un terme à sa participation au projet de recherche décrit ci-dessus. Je lui remettrai une copie signée du présent formulaire de consentement.

Nom du chercheur ou de son représentant

Signature du chercheur ou de son représentant

Fait à _____, le _____.

DÉPISTAGE PRÉLIMINAIRE POUR ÉTUDE D'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE (IRM)

Veuillez écrire en caractère d'imprimerie

Nom :	Prénom :
Date de naissance : (jour/mois/année)	Sexe : F <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/> Poids : ____ kg ____ lbs Grandeur : ____ m ____ pi
Chercheur (e) / Projet :	Numéro d'identification :

Afin d'assurer la sécurité de toute personne accédant au territoire de l'UNF, il est très important que ce questionnaire soit complété correctement.

1. Avez-vous déjà subi une opération ?

	Non	oui	Si oui, veuillez préciser le type d'opération et la date :
Tête			
Thorax ou cœur			
Abdomen			
Bras, mains			
Jambes, pieds			
Colonne vertébrale			
Yeux			
Autres :			

2. Portez-vous :

	non	oui
Stimulateur cardiaque (Pace-maker) ?		
Électrodes épicaudiques ?		
Clip pour anévrisme cérébral ?		
Prothèse cochléaire ? Prothèse auditive ?		
Filtre ou cathéter dans un vaisseau sanguin ?		
Neurostimulateur ?		
Stimulateur électronique pour les os ?		
Prothèse valvulaire cardiaque ?		
Corps étrangers métalliques ? (ex: balles, fragments d'obus, éclats métalliques)		
Pompe à insuline implantée ?		
Prothèse orthopédique ? (ex: clou, vis, plaque)		
Membre (s) artificiel (s) ?		
Maquillage permanent ? Tatouage(s) ?		

Perçage(s) ?		
Implant(s) magnétique(s) ou non magnétique(s) ?		
Diaphragme, stérilet ?		
Dentier (Appareil orthodontie) ?		
Implant(s) ou prothèse(s) oculaire(s) ?		
Système de distribution transdermique (ex: timbre de nitroglycérine)		
Autres :		

3. Êtes-vous enceinte ou croyez-vous l'être ? non oui

4. En cas de doute, accepteriez-vous de passer un test de grossesse non oui

5. Êtes-vous claustrophobe ? non oui

6. Avez-vous déjà été blessé(e) par un morceau de métal ? non oui
 (ex: accident de voiture, accident de travail, blessure(s) de guerre)
 Si oui, veuillez préciser: _____

7. Avez-vous subi un examen par résonance magnétique ? non oui

8. Avez-vous déjà été:

Machiniste?	non oui
Soudeur?	non oui
Opérateur de machinerie lourde?	non oui
Travailleur de métal ?	non oui

9. Souffrez-vous de problème respiratoire ou moteur ? non oui

On m'a expliqué les procédures à suivre lors d'une session d'IRM. On m'a informé des mesures de sécurité à appliquer et on a répondu à toutes mes questions. Je certifie que les renseignements ci-dessus sont exacts au meilleur de mes connaissances et consens à participer à une étude d'IRM.

Signature participant/parent/tuteur légal

Date

Signature médecin/chercheur

Date

- - - -

APPENDICE C - PROTOCOLE DÉTAILLÉ DES SÉANCES D'IRMf

Étape 1 – Préparation

- Introduction (remerciement, brève description des 3 étapes : préparation, simulation, scan);
- Signature des formulaires de consentement (3 copies);
- Signature des formulaires de réquisition incluant le formulaire de dépistage (3 copies);
- Vérifier si le participant ne porte pas :

Bijoux/Bagues/Boucles d'oreilles	Appareil de métal
Épingles à cheveux	Dentier
Élastiques à cheveux	Mousse ou gel pour les cheveux
Montre	Cheveux mouillés
Épingles de sûreté	Verres de contact de couleur

- Remise d'une copie de chacun des formulaires (consentement + dépistage) au participant;
- Remise d'une copie de chacun des formulaires (consentement + dépistage) à l'UNF;
- Remise un pyjama au participant;
- Déshabillage du participant (garder seulement les sous-vêtements, garder les bas et les souliers, enlever les souliers à l'entrée de la salle d'IRMf).

Étape 2 – Simulation

- Pendant que le participant attend dans la salle d'attente, préparer la salle de simulation (allumer le simulateur, drap sur le simulateur, bonnet sur le drap, les draps et le bonnet sont dans l'armoire du fond de la salle de simulation);
- Visite des lieux avec le participant (montrer où sont les salles d'IRMf et de contrôle);
- Dans la salle de simulation, montrer la boîte de réponse (avertir que la boîte sera différente dans la salle d'IRMf);
- Dire que la tâche reprend des éléments du questionnaire;
- Faire visionner le vidéo des consignes (Bureau/Raccourcis vers Chercheurs/Masson/Consignes.wmv);
- Faire réaliser la tâche de pratique par le participant (Bureau/Raccourcis vers Chercheurs/Masson/Pratique.es2) à la table (Pour interrompre la tâche en cas de problème : appuyer simultanément sur Ctrl-Alt-Esc-Shift.);
- Dire que les films sont présentés dans un ordre aléatoire (pas plus difficile au début qu'à la fin);
- Installer le participant dans le simulateur et lui donner la manette;
- Faire réaliser la tâche de pratique par le participant (Bureau/Raccourcis vers Chercheurs/Masson/Pratique.es2) dans le simulateur. (Pour interrompre la tâche en cas de problème : appuyer simultanément sur Ctrl-Alt-Esc-Shift.);
- Vérifier si le participant bouge la tête dans le simulateur lorsqu'il donne ses réponses.

- Refaire la tâche de pratique une deuxième fois dans le simulateur si nécessaire, jusqu'à ce que le sujet soit familier avec la tâche, mais aussi avec la façon de donner sa réponse, c'est-à-dire appuyer sur les boutons;
- Faire entendre le bruit du scan (sur l'ordinateur ouvrir les fichiers Bureau/Raccourcis vers Chercheurs/Masson/EPI... et Raccourcis vers Chercheurs/Masson/T1
- S'il reste du temps, le participant peut attendre dans la salle d'attente avant le début de la séance d'IRMf.
- Si le participant a attendu plus de 15 minutes dans la salle d'attente entre la simulation et le scan, il faut refaire une dernière séance de pratique avant d'entrer dans le scan (sur la table).

Étape 3 – IRMf

- Dans la salle de simulation, expliquer au sujet les différentes étapes;
- Avertir que (1) la croix apparaîtra immédiatement après avoir appuyé sur le bouton (OK d'appuyer lors de la présentation de la croix si pas eu le temps) et (2) que les images continuent à être acquises même lorsque la tâche est terminée (pendant environ 1 minute) et il ne faut pas bouger tant qu'il y a le son (et éviter les mouvements importants même entre les séquences);
- Avertir qu'il y aura des bouchons pour les oreilles (expliquer comment placer les bouchons);
- Insister sur l'importance de ne pas bouger;
- Dire qu'il y aura un bouton en forme de poire pour les urgences; il faut appuyer seulement si cela est nécessaire. Dire qu'on entend ce que le participant dit, mais pas durant les séquences, d'où la poire;
- Installer le participant dans la salle d'IRM avec la technicienne (bonnet, bouchon, boîte de réponse droite; bouton orange (2) : le film est correct; bouton vert (3) : le film est incorrect, c'est-à-dire les deux boutons du centre, fil vers l'intérieur);
- Brancher la souris à double fil (souris TTL to left button response) + hub USB + boîte de réponse + clé E-Prime 2 (la souris se trouve dans l'armoire du fond de la salle de contrôle et le fil de la boîte de réponse est accroché au comptoir);
- Avertir le participant du début et ensuite la technicienne débute la séquence de localisation (durée : environ 13s);
- Vérifier que le fil de la boîte de réponse est branché et faire un test avec Bloc Notes en demandant au participant d'appuyer sur les boutons (quand le participant appuie, la lumière devrait s'allumer (sur le mur) et le chiffre 2 ou 3 (2 : le film est correct; 3 : le film est incorrect) devrait s'inscrire dans Bloc Notes. Si des lettres apparaissent au lieu de chiffres, il faut modifier le réglage de la boîte en plaçant le bouton à la position du bas et en débranchant puis rebranchant l'alimentation. Demander l'assistance d'André Cyr, au besoin;
- Débuter la série 1, (Pour interrompre la tâche en cas de problème : appuyer simultanément sur Ctrl-Alt-Esc.). Lorsque demandé par E-prime, inscrire le numéro du sujet, pour la session choisir 1;
- Remplir la « feuille de bord » à chacune des séries (date, patient, nom des séquences, etc.);
- Parler au participant entre les séries.

Étape 4 – Raccourci des sujets

- Réhabillage + reprendre ses effets personnels;

- Recueillir les commentaires;
- Remerciement et annoncer que la photo numérique sera envoyée dans les prochains jours.

APPENDICE D - CONSIGNES LIÉES À LA TÂCHE

Introduction

La tâche à réaliser consiste à dire si les films que vous voyez à l'écran sont corrects ou incorrects, c'est-à-dire conforme à ce que vous pourriez observer si vous faisiez l'expérience. Si vous pensez que le film est correct, vous devez appuyer sur le bouton sous l'index de votre main droite. Si, au contraire, vous pensez qu'il est incorrect, vous devez plutôt appuyer sur le bouton sous le majeur de votre main droite.

Voici quelques exemples de films.

Mécanique

Ici, nous voyons deux balles qui s'apprêtent à tomber au sol. Les deux balles sont composées du même matériau, le plomb. Si on pouvait tenir ces deux balles dans nos mains, on sentirait que les deux balles sont lourdes, mais que la plus grande des deux balles, qui contient plus de plomb, est sensiblement plus lourde que la plus petite.

Après quelques instants, ces balles tombent. Ici, la petite balle en plomb tombe plus rapidement que la grande. Après avoir observé les balles tomber, il faut dire si le film est correct ou incorrect en appuyant sur un des deux boutons (index pour correct et majeur pour incorrect).

Après avoir appuyé sur le bouton, une petite croix est présentée pendant environ trois secondes. Cette petite croix marque la transition entre deux films. Vous pouvez répondre juste après que les balles soient tombées ou, si vous n'avez pas eu le temps, lors de la présentation de cette petite croix. À quelques reprises au cours de la tâche, la croix sera présentée plus longtemps (environ 9 secondes) pour vous accorder des périodes de repos.

Électricité

Dans ce deuxième film, nous apercevons des ampoules éteintes et des lignes. Chaque ligne représente un fil électrique. Après avoir ajouté une pile, on observe que les deux ampoules s'allument. Comme pour les films impliquant des balles qui tombent, vous devez dire si ce film est correct (en appuyant avec votre index) ou incorrect (en appuyant avec votre majeur). Encore une fois, après la présentation du film, une petite croix est présentée avant le début du prochain film. Vous pouvez répondre juste après que la pile soit apparue ou, si vous n'avez pas eu le temps, lors de la présentation de la petite croix. Pour les films impliquant des ampoules et des fils, la pile apparaîtra toujours au même endroit en bas de l'écran.

Série de films

Les films défilent ainsi les uns après les autres. Même si vous n'êtes pas certain de votre réponse, essayez de répondre à tous les films.

Note : Dans notre expérimentation, nous avons demandé aux participants de répondre « de leur mieux aux questions posées » et non de répondre « le plus rapidement possible » pour éviter que les participants, en particulier les novices, ressentent une pression de performance qui les amènerait à répondre rapidement sans réfléchir à la situation. Mais dans tous les cas, la consigne qui leur a été adressée a été exactement la même, ce qui laisse supposer que les temps de réaction des experts et des novices puissent tout de même être considérés.

RÉFÉRENCES

- Amaro, E., & Barker, G. J. (2006). Study design in fMRI: Basics principles. *Brain and Cognition*, 60, 220-232.
- Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Review Neuroscience*, 9(4), 278-291.
- Ashburner, J., & Friston, K. J. (2005). Unified segmentation. *NeuroImage*, 26(3), 839-851.
- Astolfi, J.-P., & Peterfalvi, B. (1997). Stratégies de travail des obstacles : dispositifs et ressorts. *Aster*, 25, 193-216.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- Bandettini, P. A., & Cox, R. W. (2000). Event-related fMRI contrast when using constant interstimulus interval: Theory and experiment. *Magnetic Resonance in Medicine*, 43(4), 540-548.
- Battro, A. M., Fischer, K. W., & Léna, P. J. (2008). *The educated brain: Essays in neuroeducation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Beaulieu, C., Plewes, C., Paulson, L. A., Roy, D., Snook, L., Concha, L., & Phillips, L. (2005). Imaging brain connectivity in children with diverse reading ability. *NeuroImage*, 25(4), 1266-1271.
- Bechtel, W. (2005). The challenge of characterizing operations in the mechanisms underlying behavior. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 84(3), 313-325.
- Bé langer, M. (2008). *Du changement conceptuel à la complexification conceptuelle dans l'apprentissage des sciences*. Thèse de doctorat inédite, Université de Montréal.
- Bench, C. J., Frith, C. D., Grasby, P. M., Friston, K. J., Paulesu, E., Frackowiak, R. S. J., & Dolan, R. J. (1993). Investigations of the functional anatomy of attention using the stroop test. *Neuropsychologia*, 31(9), 907-922.
- Benefield, H., Crosson, B., Cato, M. A., Sadek, J. R., Gopinath, K., & Soltysik, D. (2000). Role of medial frontal cortex in word retrieval. *NeuroImage*, 11, S278.

- Berger, H. (1929). Über das elektrenkephalogramm des menschen. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 87(1), 527-570.
- Billington, J., Baron-Cohen, S., & Wheelwright, S. (2007). Cognitive style predicts entry into physical sciences and humanities: Questionnaire and performance tests of empathy and systemizing. *Learning and Individual Differences*, 17(3), 260-268.
- Blanke, O., Mohr, C., Michel, C. M., Pascual-Leone, A., Brugger, P., Seeck, M., . . . Thut, G. (2005). Linking out-of-body experience and self processing to mental own-body imagery at the temporoparietal junction. *The Journal of neuroscience*, 25(3), 550-557.
- Bliss, T. V. P., & Lomo, T. (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *The Journal of Physiology*, 232(2), 331-356.
- Blumenfeld, R. S., & Ranganath, C. (2006). Dorsolateral prefrontal cortex promotes long-term memory formation through its role in working memory organization. *The Journal of Neuroscience*, 26(3), 916-925.
- Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision making: reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective, & Behavior Neuroscience*, 7(4), 356-366.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108(3), 634-652.
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: An update. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(12), 539-546.
- Brown, D. E. (1993). Refocusing core intuitions: A concretizing role for analogy in conceptua change. *Journal of Reseach in Science Teaching*, 20, 1273-1290.
- Bruer, J. T. (1997). Education and the brain: A bridge too far. *Educational Researcher*, 26(8), 4-16.
- Bruer, J. T. (2006). On the implications of neuroscience research for science teaching and learning: Are there any? *CBE-Life Science Education*, 5, 104-110.
- Buckner, R. L. (1998). Event-related fMRI and the hemodynamic response. *Human Brain Mapping*, 6(5-6), 373-377.

- Bush, G., Whalen, P. J., Rosen, B. R., Jenike, M. A., McInerney, S. C., & Rauch, S. L. (1998). The counting stroop: An interference task specialized for functional neuroimaging - validation study with functional MRI. *Human Brain Mapping*, 6(4), 270-282.
- Carey, S. (1988). Reorganization of knowledge in the course of acquisition. In L. A. Hirschfeld & S. A. Gelman (Eds.), *Ontogeny, phylogeny, and historical development*. Norwood, NJ: Ablex.
- Carreiras, M., Seghier, M. L., Baquero, S., Estevez, A., Lozano, A., Devlin, J. T., & Price, C. J. (2009). An anatomical signature for literacy. *Nature*, 461(7266), 983-986.
- Castro-Caldas, A., Petersson, K., Reis, A., Stone-Elander, S., & Ingvar, M. (1998). The illiterate brain. Learning to read and write during childhood influences the functional organization of the adult brain. *Brain*, 121(6), 1053-1063.
- Çepni, S., & Keleş, E. (2006). Turkish students' conceptions about the simple electric circuits. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4(2), 269-291.
- Chen, C.-Y., Muggleton, N. G., Tzeng, O. J. L., Hung, D. L., & Juan, C.-H. (2009). Control of prepotent responses by the superior medial frontal cortex. *NeuroImage*, 44(2), 537-545.
- Chi, M. T. H. (1992). Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. In R. Giere (Ed.), *Cognitive models of science: Minnesota studies in the philosophy of science* (pp. 129-186). Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.
- Chinn, C. A., & Samarapungavan, A. L. A. (2009). Conceptual change—multiple routes, multiple mechanisms: A commentary on Ohlsson (2009). *Educational Psychologist*, 44(1), 48-57.
- Clement, J. (1993). Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(10), 1241-1257.
- Cohen, D. (1972). Magnetoencephalography: Detection of the Brain's Electrical Activity with a Superconducting Magnetometer. *Science*, 175(4022), 664-666.
- Confrey, J. (1990). A review of the research on student conceptions in mathematics, science, and programming In C. B. Cazden (Ed.), *Review of research in*

- education* (Vol. 16, pp. 3-56). Washington, NW: American Educational Research Association.
- Conseil de la science et de la technologie (2004). *La culture scientifique et technique : une interface entre les sciences, la technologie et la société*. Sainte-Foy : Gouvernement du Québec.
- Craver, C. F., & Bechtel, W. (2006). Mechanism. In S. Sarkar & J. Pleifer (Eds.), *Philosophy of Science: an encyclopedia* (pp. 469-478). New York: Routledge.
- Craver, C. F., & Darden, L. (2001). Discovering mechanisms in biology. In P. K. Machamer, R. Grush & P. McLaughlin (Eds.), *Theory and method in the neurosciences* (pp. 112-137). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Curtis, C. E., & D'Esposito, M. (2003). Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(9), 415-423.
- Damasio, H., Grabowski, T., Frank, R., Galaburda, A. M., & Damasio, A. R. (1994). The return of phineas gage: Clues about the brain from the skull of a famous patient. *Science*, 264(5162), 1102-1105.
- Dehaene, S. (2007). *Les neurones de la lecture*. Paris : Odile Jacob.
- Dehaene, S., Le Clec'H, G., Poline, J.-B., Le Bihan, D., & Cohen, L. (2002). The visual word form area: A prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *NeuroReport*, 13(3), 321-325.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105-225.
- diSessa, A. A. (2006). A history of conceptual change research: Threads and fault lines. In R. K. Sawyer (Ed.), *Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 265-281). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- diSessa, A. A. (2008). A bird's-eye view of the "pieces" vs. "coherence" controversy (from the "pieces" side of the fence). In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change*: Routledge.
- diSessa, A. A., Gillespie, N. M., & Esterly, J. B. (2004). Coherence versus fragmentation in the development of the concept of force. *Cognitive Science*, 28(6), 843-900.

- Duit, R. (2009). Bibliography on students' and teachers' conceptions and science education. Récupéré le 27 octobre 2009 de <http://ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>
- Duit, R., & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671-688.
- Dunbar, K. N., Fugelsang, J. A., & Stein, C. (2007). Do naïve theories ever go away? Using brain and behavior to understand changes in concepts. In M. C. Lovett & P. Shah (Eds.), *Thinking with data: 33rd Carnegie symposium on cognition* (pp. 193-206). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Fischer, K. W., Daniel, D. B., Immordino-Yang, M. H., Stern, E., Battro, A., & Koizumi, H. (2007). Why mind, brain, and education? Why now? *Mind, Brain, and Education*, 1(1), 1-2.
- Fischer, K. W. (2009). Mind, brain, and education: Building a scientific groundwork for learning and teaching. *Mind, Brain, and Education*, 3(1), 3-16.
- Friston, K., Williams, S., Howard, R., Frackowiak, R., & Turner, R. (1996). Movement-related effects in fMRI time-series. *Magnetic Resonance in Medicine*, 35(3), 346-355.
- Fugelsang, J. A., & Dunbar, K. N. (2005). Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking. *Neuropsychologia*, 43(8), 1204-1213.
- Gabel, D. L., Sherwood, R., & Enochs, L. (1984). Problem-solving skill of high school chemistry students. *Journal of Research in Science Teaching*, 21, 221-233.
- Geake, J., & Cooper, P. (2003). Cognitive neuroscience: Implications for education. *Westminster Studies in Education*, 26(1), 7-20.
- Geake, J. G. (2003). Adapting middle level educational practices to current research on brain functioning. *Journal of the New England League of Middle Schools*, 15(2), 6-12.
- Geake, J. G. (2004). Cognitive neuroscience and education: Two-way traffic or one-way street? *Westminster Studies in Education*, 27(1), 87- 98.
- Gentner, D., Brem, S., Ferguson, R. W., Markman, A. B., Levidow, B. B., Wolfe, P., & Forbus, K. D. (1997). Analogical reasoning and conceptual change: A case study of Johannes Kepler. *Journal of the Learning Sciences*, 6(1), 3-40.

- Goel, V., & Dolan, R. J. (2003). Explaining modulation of reasoning by belief. *Cognition*, 87(1), 11-22.
- Good, R. (1991). Editorial. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(5), 387.
- Goswami, U. (2004). Neuroscience and education. *British Journal of Educational Psychology*, 74(1), 1-14.
- Goswami, U. (2006). Neuroscience and education: From research to practice? *Nature Review Neuroscience*, 7, 406-413.
- Grabner, R. H., Ansari, D., Koschutnig, K., Reishofer, G., Ebner, F., & Neuper, C. (2009). To retrieve or to calculate? Left angular gyrus mediates the retrieval of arithmetic facts during problem solving. *Neuropsychologia*, 47(2), 604-608.
- Grabner, R. H., Ansari, D., Reishofer, G., Stern, E., Ebner, F., & Neuper, C. (2007). Individual differences in mathematical competence predict parietal brain activation during mental calculation. *NeuroImage*, 38(2), 346-356.
- Guzzetti, B. J., Snyder, T. E., Glass, G. V., & Gamas, W. S. (1993). Promoting conceptual change in science: A comparative meta-analysis of instructional interventions from reading education and science education. *Reading Research Quarterly*, 28(2), 117-154.
- Hashweh, M. (1988). Descriptive studies of students' conceptions in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 25(2), 121-134.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior*. New York: Wiley.
- Henson, R. (2005). What can functional neuroimaging tell the experimental psychologist? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 58(2), 193-233.
- Hestenes, D., Wells, W., & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141-158.
- Houdé, O. (2006). Neuropédagogie? Entretien avec Olivier Houdé réalisé par Gilles Marchand. *Le Monde de l'intelligence*, 4, 18-19.
- Houdé, O., Zago, L., Crivello, F., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: Evidence from a training paradigm. *NeuroImage*, 14, 1486-1492.

- Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(5), 721-728.
- Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2004). *Functional magnetic resonance imaging*. Sunderland, USA: Sinauer Associates Inc.
- Isoda, M., & Hikosaka, O. (2007). Switching from automatic to controlled action by monkey medial frontal cortex. *Nature Neuroscience*, 10(2), 240-248.
- Johnston, A. T., & Southerland, S. A. (2001, March). *Conceptualizing the nature of sciences: Extra-rational evaluations of tiny atoms, round planets, and big bangs*. Paper presented at the Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching, St-Louis, MO.
- Kaufman, D. R., Vosniadou, S., diSessa, A. A., & Thagard, P. (2000). *Scientific explanation, systematicity, and conceptual change*. Paper presented at the Twenty-Second Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Philadelphia, PA.
- Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kwon, Y.-J., & Lawson, A. E. (2000). Linking brain growth with the development of scientific reasoning ability and conceptual change during adolescence. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(1), 44-62.
- Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Chesler, D. A., Goldberg, I. E., Weisskoff, R. M., Poncelet, B. P., . . . Rosen, B. R. (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89, 5675-5679.
- Larochelle, M., & Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science*. Québec : Les Presses de l'Université Laval.
- Legendre, M.-F. (2002). Le rôle du raisonnement qualitatif dans les processus de changement conceptuel et ses implications pour l'enseignement. Dans R. M. J. Toussaint (Dir.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences, recherches et pratiques* (pp. 177-203). Montréal : Les Éditions Logiques.

- Lin, H.-S., Hung, F.-Y., & Hung, S.-C. (2002). Using the history of science to promote students' problem-solving. *International Journal of Science Education*, 25(5), 453-464.
- Liu, X. (2001). Synthesizing research on student conceptions in science. *International Journal of Science Education*, 23(1), 55-81.
- Lombrozo, T., Kelemen, D., & Zaitchik, D. (2007). Inferring design: Evidence of a preference for teleological explanations in patients with Alzheimer's disease. *Psychological Science*, 18(11), 999-1006.
- Maki, A., Yamashita, Y., Ito, Y., Watanabe, E., Mayanagi, Y., & Koizumi, H. (1995). Spatial and temporal analysis of human motor activity using noninvasive NIR topography. *Medical Physics*, 22(12), 1997-2005.
- Marinkovic, K., Dhond, R. P., Dale, A. M., Glessner, M., Carr, V., & Halgren, E. (2003). Spatiotemporal dynamics of modality-specific and supramodal word processing. *Neuron*, 38(3), 487-497.
- Mazoyer, B. (2001). L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Dans O. Houdé, B. Mazoyer & N. Tzourio-Mazoyer (Dir.), *Cerveau et psychologie: introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle* (pp. 231-256). Paris : Presses Universitaires de France.
- Mazoyer, P., Wicker, B., & Fonlupt, P. (2002). A neural network elicited by parametric manipulation of the attention load. *NeuroReport*, 13(17), 2331.
- Meltzoff, A. N., Kuhl, P. K., Movellan, J., & Sejnowski, T. J. (2009). Foundations for a New Science of Learning. *Science*, 325(5938), 284-288.
- Ministère de l'Éducation, Gouvernement du Québec (2006). *Programme de formation de l'école québécoise : éducation préscolaire et enseignement primaire - domaine de la science et de la technologie*. Québec : Ministère de l'Éducation.
- Menon, V., Adelman, N. E., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2001). Error-related brain activation during a go/nogo response inhibition task. *Human Brain Mapping*, 12(3), 131-143.
- Millar, R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education*, 11(5), 587 - 596.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167-202.

- Mortimer, E. F. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, 4(3), 267-285.
- Nakhleh, M. B., & Mitchell, R. C. (1993). Concept learning versus problem solving, there is a difference. *Journal of Chemical Education*, 70(3), 190-192.
- Nathaniel-James, D. A., Fletcher, P., & Frith, C. D. (1997). The functional anatomy of verbal initiation and suppression using the Hayling test. *Neuropsychologia*, 35(4), 559-566.
- Nelson, J. K., Lizcano, R. A., Atkins, L., & Dunbar, K. (2007, November 17). *Conceptual judgments of expert vs. novice chemistry students: an fMRI study*. Paper presented at the 48th Annual meeting of the Psychonomic Society, Hyatt Regency Hotel Long Beach, California.
- Nussbaum, J., & Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: Toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11(3), 183-200.
- O'Boyle, M. W., & Gill, H. S. (1998). On the relevance of research findings in cognitive neuroscience to educational practice. *Educational Psychology Review*, 10(4), 397-409.
- OCDE. (2002). *Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage*. Paris : Éditions de l'OCDE.
- OCDE. (2007a). *Comprendre le cerveau : naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage*. Paris : Éditions de l'OCDE.
- OCDE. (2007b). *PISA 2006. Les compétences en sciences, un atout pour réussir*. Paris : Éditions de l'OCDE.
- Ogawa, S., Lee, T. M., Kay, A. R., & Tank, D. W. (1990). Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87(24), 9868-9872.
- Ogawa, S., Tank, D. W., Menon, R. S., Ellermann, J. M., Kim, S.-G., Merkle, H., & Ugurbil, K. (1992). Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: Functional brain mapping using MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89(5951-5955).

- Periago, M. C., & Bohigas, X. (2005). A study of second-year engineering students' alternative conceptions about electric potential, current intensity and Ohm's law. *European Journal of Engineering Education*, 30(1), 71-80.
- Petitto, L.-A., & Dunbar, K. (2004). New findings from educational neuroscience on bilingual brains, scientific brains, and the educated mind. In K. Fisher & T. Katzir (Eds.), *Building usable knowledge in mind, brain, & education*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pintrich, P. R. (1993). Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Review of Educational Research*, 63(2), 167-199.
- Poldrack, R. A., Clark, J., Pare-Blagoev, E. J., Shohamy, D., Crespo Moyano, J., Myers, C., & Gluck, M. A. (2001). Interactive memory systems in the human brain. *Nature*, 414(6863), 546-550.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.
- Potvin, P. (1998). *État de la question de la problématique du conflit cognitif en sciences au secondaire*. Mémoire de maîtrise inédit, Université du Québec à Montréal.
- Potvin, P., & Thouin, M. (2003). Étude qualitative d'évolutions conceptuelles en contexte d'explorations libres en physique-mécanique au secondaire. *Revue des sciences de l'éducation*, 29(3), 525-544.
- Reivich, M., Kuhl, D., Wolf, A., Greenberg, J., Phelps, M., Ido, T., . . . Sokoloff, L. (1979). The [18F]fluorodeoxyglucose method for the measurement of local cerebral glucose utilization in man. *Circulation Research*, 44(1), 127-137.
- Revonsuo, A. (2001). On the nature of explanation in the neurosciences. In P. K. Machamer, R. Grush & P. McLaughlin (Eds.), *Theory and method in the neurosciences* (pp. 45-69). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Rowe, J. B., Toni, I., Josephs, O., Frackowiak, R. S. J., & Passingham, R. E. (2000). The prefrontal cortex: Response selection or maintenance within working memory? *Science*, 288(5471), 1656-1660.

- Saxe, R. R., Whitfield-Gabrieli, S., Scholz, J., & Pelphey, K. A. (2009). Brain regions for perceiving and reasoning about other people in school-aged children. *Child Development*, 80(4), 1197-1209.
- Solomon, J. (1983). Learning about energy: How pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5(1), 49 - 59.
- Solomon, J. (1984). Prompts, cues and discrimination: The utilization of two separate knowledge systems. *European Journal of Science Education*, 6(3), 277 - 284.
- Stavy, R., & Babai, R. (2010). Overcoming intuitive interference in mathematics: Insights from behavioral, brain imaging and intervention studies. *ZDM Mathematics Education*, 42(6), 621-633.
- Stavy, R., & Tirosh, D. (2000). *How students (mis-)understand science and mathematics: Intuitive rules*. New York: Teachers College Press.
- Stern, E. (2005). Pedagogy meets neuroscience. *Science*, 310(5749), 3.
- Strike, K. A., & Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. In R. A. Duschl & R. J. Hamilton (Eds.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (pp. 147-176). Albany: State University of New York Press.
- Stroop, J. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology: General*, 18, 643-662.
- Tarkiainen, A., Cornelissen, P. L., & Salmelin, R. (2002). Dynamics of visual feature analysis and object-level processing in face versus letter-string perception. *Brain*, 125(5), 1125-1136.
- The Royal Society. (2011). *Neuroscience: Implications for education and lifelong learning*. London: The Royal Society.
- Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A., & Eden, G. F. (2003). Development of neural mechanisms for reading. *Nature Neuroscience*, 6(7), 767-773.
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, 1(2), 205-221.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69.

- Vosniadou, S. (2002). On the nature of naïve physics. In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change: Issues in theory and practice* (pp. 61-76). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J., & Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. In D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 177-210). New York: Macmillan.
- Ward, J. (2010). *The student's guide to cognitive neuroscience: Second edition*. New York: Psychology Press.
- Weller, H. G. (1995). Diagnosing and altering three aristotelian alternative conceptions in dynamics: Microcomputer simulations of scientific models. *Journal of Research in Science Teaching*, 32(3), 271-290.
- Wernicke, C. (1874). *Der aphasische symptomkomplex*. Brèslau: Cohen and Weigart.
- Zaitchik, D., & Solomon, G. E. (2008). Animist thinking in the elderly and in patients with Alzheimer's disease. *Cognitive Neuropsychology*, 25(1), 27-37.
- Zamarian, L., Ischebeck, A., & Delazer, M. (2009). Neuroscience of learning arithmetic: Evidence from brain imaging studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(6), 909-925.
- Zeyer, A., & Wolf, S. (2010). Is there a relationship between brain type, sex and motivation to learn science? *International Journal of Science Education*, 32(16), 2217-2233.